

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA  
Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências da Terra

**CONTRIBUTO PARA A GESTÃO DO RISCO GEOTÉCNICO NA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS**

Por

Mário André Fernandes Cândido  
(Licenciado em Engenharia Geológica)

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientadora: Doutora Eng.<sup>a</sup> Ana Paula Fernandes da Silva  
Co-orientador: Inv. Coordenador António Silva Gomes

Lisboa

2010



*Aos meus pais.*



*“Choose a job you love and you will never have to work a day in your life”  
Confucius, ancient Chinese philosopher*



## **Agradecimentos**

A realização desta dissertação é o culminar de um dos diversos objectivos de vida que me propus a atingir, o qual não seria possível ser concretizado sem o apoio e colaboração de diversas pessoas. Nesta secção tenho a possibilidade de expressar o sentimento de profundo agradecimento que usufruo por todos aqueles que, de uma forma ou de outra, mais ou menos marcadamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Posto isto, expresso os meus mais sinceros agradecimentos:

- ✓ À Prof.<sup>a</sup> Ana Paula F. da Silva, por toda a amizade, incentivo e paciência demonstrada particularmente durante este último ano e pela ajuda incansável na orientação desta dissertação, bem como pelo fornecimento de documentação, revisão e crítica deste trabalho;
- ✓ Ao Prof. A. Silva Gomes pela amizade, orientação, revisão e crítica. Bem como pelo fornecimento de documentação, conhecimentos fundamentais e motivação que me transmitiu ao longo deste trabalho;
- ✓ Ao Prof. Pedro Lamas, pela amizade demonstrada e pela sua disponibilidade para ajudar sempre que necessário;
- ✓ Aos pais, por todo o amor, carinho e amizade com que sempre me apoiaram ao longo destes anos, bem como a educação, os valores que me transmitiram e a base que construíram, para me tornar na pessoa que hoje sou;
- ✓ À minha irmã por todo o amor, carinho e amizade demonstrada durante a minha vida;
- ✓ Aos meus avós por me aturarem durante todos estes anos e pelo carinho e ajuda incansável que têm demonstrado; e claro a todos os restantes familiares;
- ✓ Aos amigos e colegas, Bruno, Tiago, Gonçalo, Raquel, Joana, Nádia, Fernandes, Pepe, Rute, Mariana, Tatiana, Sara, entre outros, por toda a amizade e companheirismo demonstrado durante estes anos académicos e que espero que perdurem para sempre;
- ✓ A Deus por estar sempre presente.

A todos o meu mais profundo e sentido obrigado. Este trabalho também vos pertence.





## Resumo

Os riscos geotécnicos decorrentes de condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas imprevistas podem ter consequências graves em termos de segurança, de controlo de prazos e, consequentemente, de custos em todos os grandes empreendimentos de Engenharia Civil. De entre eles, os túneis constituem obras às quais estão necessariamente inerentes incertezas e riscos fortuitos em fase de projecto e apenas revelados na fase construtiva. Neste contexto, verifica-se a necessidade de implementar para os túneis planos de gestão de risco geotécnico, que envolvam a identificação precoce dos perigos, bem como a sua avaliação, mitigação, controlo e observação, através do acompanhamento e monitorização da obra e a comunicação dos respectivos resultados através de documentos designados de registos de risco.

Esta dissertação versa sobre a gestão dos potenciais riscos geotécnicos de túneis, isto é, perigos sob a forma de condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas imprevistas ou imprevisíveis, associados às principais actividades de construção. O objectivo primordial dessa gestão é garantir uma resposta técnica e organizacional atempada para evitar eventos indesejáveis, que possam afectar negativamente a obra, e assegurar um processo de construção contínuo, económico e seguro. Introduce-se uma descrição de todo o processo de gestão do risco aplicado a túneis. Para além da descrição das etapas inerentes ao plano de gestão de riscos, são expostas algumas técnicas e métodos de análise mais usuais, bem como as principais actividades associadas que devem ser desenvolvidas durante a construção. Apresentam-se ainda algumas considerações sobre os aspectos contratuais ligados a esta temática e a importância da partilha do risco entre as partes intervenientes.

A dissertação termina com a exposição de um caso de estudo hipotético, sendo aplicada uma metodologia de gestão proposta, com passos claramente identificados, baseada numa abordagem qualitativa e que poderá potencialmente ser implementada em futuras obras análogas.

**Palavras-chave:** Risco geotécnico; gestão do risco; análise qualitativa; túneis.



## **Abstract**

Geotechnical risks related to unforeseen geological, hydrogeological and geotechnical conditions may have serious consequences in security, control of time and costs in all major projects of Civil Engineering. Among them, tunnel projects are those having inherent uncertainties and incidental risks at the design phase, which are only revealed at the construction phase. In this framework, there is a need for the implementation of geotechnical risk management plans for tunnels, which should involve the early identification of hazards as well as their assessment, mitigation, control and observation, through the construction accompanying and monitoring and communicating their results by documents called risk registers.

This dissertation focuses on the management of potential geotechnical risks in tunnels, i.e., hazards associated with major construction activities in the form of geological, hydrogeological and geotechnical unexpected or unforeseen conditions. The main objective of such management is to ensure a technical and organizational timely response preventing undesirable events which may affect adversely the project, and also ensuring a continuous, economic and secure construction phase. A description of the complete process of risk management applied to tunnels is introduced. Besides the description of the steps involved in the risks management plan, some techniques and the most usual analysis methods are also exposed, as well as the main activities that should be developed during construction phase. Some further considerations on contractual features related to this subject and the importance of risk sharing between the parties involved are present.

The disclosure of an hypothetical case study involving the application of a management methodology proposed, which may potentially be implemented in similar future projects, based on a qualitative approach, with a clear identification of all the steps developed, closes this dissertation.

**Keywords:** Geotechnical risk; risk management; qualitative analysis; tunnels.



## Simbologia

### Alfabeto Latino:

c	Coesão em termos de tensões totais;
E	Módulo de deformabilidade;
F	Grau de fracturação do maciço;
Ja	<i>Joint Alteration Number</i> – alteração das paredes das diaclases (sistema Q);
Jn	<i>Joint Set Number</i> – número de famílias de diaclases (sistema Q);
Jr	<i>Joint Roughness Number</i> – rugosidade das diaclases (sistema Q);
Jw	<i>Joint Water Reduction Factor</i> – condições hidráulicas do maciço (sistema Q);
Lu	Unidade Lugeon;
Q	Índice de qualidade do maciço do Sistema Q (Barton);
W	Estado de meteorização do maciço.

### Alfabeto Grego:

$\phi_m$	Ângulo de atrito do maciço rochoso;
$\alpha$	Coeficiente de sismicidade;
$\Omega$	Ohm.



## Abreviaturas

ALARP	<i>As Low As Reasonably Possible;</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers;</i>
BOT	<i>Build – Operate – Transfer;</i>
BTS	<i>British Tunnelling Society;</i>
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens;
DAT	<i>Decision Aids for Tunneling;</i>
DSC	<i>Differing Site Conditions;</i>
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> - por exemplo;
EC7	Eurocódigo 7 – Projecto Geotécnico;
EPB	<i>Earth Pressure Balance;</i>
<i>et al.</i>	<i>et alii – e outros;</i>
ETA	<i>Event Tree Analysis</i> - Análise por árvore de eventos;
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia;
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa;
FIDIC	<i>International Federation of Consulting Engineers;</i>
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> - Análises dos Modos de Falha e dos seus Efeitos;
FMECA	<i>Failure Modes, Effects and Criticality Analysis</i> - Análise dos Modos de Falha, Efeitos e Severidade;
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> - Análise por árvore de falhas;
HAZOP	<i>HAZard and OPerability Analysis</i> - Análise dos perigos e da operacionalidade;
<i>ib.</i>	<i>ibidem</i> - no mesmo lugar;
<i>i.e.</i>	<i>id est</i> - isto é;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ITA	<i>International Tunneling Association;</i>
ITIG	<i>International Tunnelling Insurance Group;</i>
LFAV	Linhas Ferroviárias de Alta Velocidade;
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil;
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology;</i>
MO	Método Observacional;
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i> - Novo método austríaco de construção de túneis;

<i>op. cit.</i>	<i>opere citatum</i> - obra citada;
PAT	Plano de Avanço do Túnel;
PGR	Plano de Gestão do Risco;
pp.	páginas;
RCU	Resistência à compressão uniaxial;
REC	Percentagem de recuperação em manobras de sondagens;
RGR	Relatório Geotécnico de Referência;
RISK	<i>Risk Assessment and Management for High-Speed Rail Systems</i> ;
RMR	<i>Rock Mass Rating</i> (Bieniawski);
RQD	<i>Rock Quality Designation</i> – Índice de recuperação modificado (Deere);
RR	Registo de Riscos;
RSAEEP	Regulamento de Segurança a Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes;
SIG	Sistema de Informação Geográfica;
SPG	Sociedade Portuguesa de Geotecnia;
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i> – factor de redução pelas tensões (sistema Q);
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i> – Tuneladora;
UM	Universidade do Minho.



## Índices

Dedicatória .....	iii
Agradecimentos .....	vii
Resumo .....	ix
Abstract .....	xi
Simbologia .....	xiii
Abreviaturas .....	xv
Índices .....	xvii
Índice de Figuras.....	xxi
Índice de Quadros .....	xxiii
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2 OBJECTIVOS.....	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	12
2 ESTADO DA ARTE.....	15
2.1 CONCEITOS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS.....	15
2.1.1 Incerteza e risco .....	15
2.1.2 Outros.....	18
2.2 SITUAÇÃO ACTUAL .....	21
2.2.1 Internacional .....	21
2.2.2 Nacional.....	23
2.3 RISCOS GEOTÉCNICOS E SUAS IMPLICAÇÕES .....	26
2.4 ALGUNS CASOS HISTÓRICOS .....	29
2.5 ETAPAS DE GESTÃO DE RISCO E FASES DE OBRA .....	34
3 PROCESSOS DE GESTÃO DO RISCO GEOTÉCNICO EM TÚNEIS .....	41
3.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PERIGOS/RISCOS GEOTÉCNICOS.....	41
3.1.1 Principais metodologias .....	41
3.1.2 Identificação por listas de verificação .....	44
3.1.2.1 Perigos geotécnicos .....	47

3.1.2.2 Riscos geotécnicos relativos ao método construtivo.....	48
3.2 AVALIAÇÃO DO RISCO .....	49
3.2.1 Análise do risco .....	49
3.2.1.1 Árvore de falhas (FTA).....	50
3.2.1.2 Árvore de eventos (ETA) .....	55
3.2.1.3 Classificação do risco.....	60
3.2.2 Apreciação do risco .....	64
3.3 MITIGAÇÃO DO RISCO.....	67
3.3.1 Definição de estratégias/prioridades.....	68
3.3.2 O papel da prospecção geotécnica .....	72
3.3.2.1 Durante o projecto.....	72
3.3.2.2 Durante a obra .....	77
3.3.3 Selecção do método construtivo.....	81
3.3.3.1 Impacte na obra .....	81
3.3.3.2 Caso prático de aplicação.....	83
4 ASPECTOS CONTRATUAIS.....	87
4.1 ENQUADRAMENTO .....	87
4.2 CONTRATOS E RESPONSABILIDADE PELO RISCO GEOTÉCNICO .....	88
4.3 ALOCAÇÃO/PARTILHA DO RISCO GEOTÉCNICO .....	93
4.3.1 Relevância .....	93
4.3.2 Método norueguês.....	97
4.4 RELATÓRIO GEOTÉCNICO DE REFERÊNCIA (RGR) .....	100
5 GESTÃO DO RISCO GEOTÉCNICO NA FASE CONSTRUTIVA.....	105
5.1 GENERALIDADES .....	105
5.2 RESPONSABILIDADE DA GESTÃO .....	107
5.3 OBSERVAÇÃO E CONTROLO DO RISCO RESIDUAL.....	109
5.3.1 Método observacional (MO) .....	115
5.3.2 Observação, registo e comunicação.....	121
5.3.3 Níveis de alerta e de alarme.....	127

5.4	REGISTO DE RISCOS (RR) .....	130
5.5	PLANO DE AVANÇO DO TÚNEL (PAT).....	134
6	CASO DE ESTUDO HIPOTÉTICO.....	137
6.1	METODOLOGIA DE GESTÃO .....	138
6.2	DEFINIÇÃO DO CONTEXTO.....	142
6.2.1	Descrição geral da obra.....	142
6.2.2	Enquadramento geológico - geotécnico .....	143
6.2.3	Trabalhos de prospecção geotécnica.....	145
6.2.4	Considerações geotécnicas .....	146
6.2.4.1	Zonamento geotécnico .....	147
6.2.4.2	Classificação geomecânica do maciço .....	148
6.2.4.3	Dimensionamento do método de escavação e sustimento.....	149
6.3	IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS GEOTÉCNICOS .....	151
6.4	AVALIAÇÃO DOS RISCOS .....	154
6.4.1	Análise .....	154
6.4.2	Apreciação.....	158
6.5	MITIGAÇÃO DOS RISCOS.....	161
6.6	OBSERVAÇÃO, CONTROLO E REVISÃO DOS RISCOS.....	164
6.7	COMUNICAÇÃO DOS RISCOS .....	165
6.7.1	Registo dos riscos geotécnicos.....	165
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	169
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	169
7.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	175
	ANEXOS .....	185
	ANEXO I – PRINCIPAIS PERIGOS GEOTÉCNICOS E RISCOS RELATIVOS AO MÉTODO CONSTRUTIVO EM TÚNEIS	
	ANEXO II - REGISTO DE RISCOS GEOTÉCNICOS PARA O CASO DE ESTUDO HIPOTÉTICO	



## Índice de Figuras

Figura 1.1. A atitude face ao risco (Hoek, 2007). .....	3
Figura 1.2. O objectivo da gestão do risco (Grasso <i>et al.</i> , 2006, adaptado).....	4
Figura 1.3. Plano de gestão do risco (Powell & Silverton, 2003, adaptado). .....	6
Figura 1.4. Equilíbrio ente gestão do empreendimento e gestão do risco (Grasso <i>et al.</i> , 2008, adaptado). .....	10
Figura 2.1. As mais prováveis consequências dos riscos geotécnicos em túneis (Highways Agency <i>et al.</i> , 2002, adaptado). .....	26
Figura 2.2. Problemas relacionados com o terreno encontrados na construção de obras (Clayton, 2001 <i>in</i> Henderson & Pickles, 2007, adaptado). .....	28
Figura 2.3. Revisão da origem dos problemas geotécnicos encontrados na construção de obras (Clayton, 2001 <i>in</i> Henderson & Pickles, 2007, adaptado). .....	28
Figura 2.4. Autocarro dentro da cratera formada na sequência do colapso de um túnel do metro de Munique (Munich Re Group, 2004). .....	30
Figura 2.5. Subsidência provocada pelo desabamento de um túnel do metro de Taegu (Wagner & Knights, 2006). .....	31
Figura 2.6. Aspecto geral da estação Pinheiros do metro de São Paulo após o acidente (Globo, 2007). .....	32
Figura 2.7. Gestão e redução do risco durante as diferentes fases da obra (Schubert, 2004, adaptado). .....	35
Figura 2.8. Modelo GeoQ de gestão do risco (Brinkman, 2008, adaptado).....	36
Figura 2.9. Fluxograma de risco fase de projecto <i>versus</i> fase de construção (Wagner, 2006, adaptado). .....	37
Figura 2.10. Secção transversal adoptada para o túnel SDSU (Silverton <i>et al.</i> , 2004, adaptado).....	39
Figura 3.1. Métodos e procedimentos mais utilizados na identificação de riscos em túneis.....	42
Figura 3.2. Técnicas de identificação de risco mais usadas em túneis (Flores, 2006, adaptado). .....	44
Figura 3.3. Procedimento da análise por listas de verificação (United States Coast Guard, 2000a, adaptado). .....	47
Figura 3.4. FTA de colapso da secção do túnel (Šejnoha <i>et al.</i> , 2009, adaptado). .....	54
Figura 3.5. Detalhe do ramo G, condições geotécnicas desfavoráveis (Šejnoha <i>et al.</i> , 2009, adaptado). .....	54
Figura 3.6. Condições geotécnicas do trecho do túnel Bundang (Hong <i>et al.</i> , 2009, adaptado). .....	58
Figura 3.7. Árvore de eventos (ETA) para terreno com condições desfavoráveis no túnel Bundang (Hong <i>et al.</i> , 2009, adaptado).....	59

Figura 3.8. Adopção do princípio ALARP na definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco (Leca & Eskesen, 2006, adaptado).....	66
Figura 3.9. Estratégias de mitigação do risco.....	68
Figura 3.10. Variação do custo da obra em função da relação comprimento total de sondagens e comprimento do túnel (Hoek & Palmeiri, 1998, adaptado).....	73
Figura 3.11. Contraste da classificação do terreno entre a fase de estudo prévio e a fase de construção de um túnel (Ikuma, 2008, adaptado).....	74
Figura 3.12. Árvore de decisão para a selecção da TBM mais apropriada (Khademi <i>et al.</i> , 2006 <i>in</i> Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	84
Figura 4.1. Evolução contratual em túneis (Staveren, 2006, adaptado).....	91
Figura 4.2. Optimização conceptual da partilha de risco segundo a prática norueguesa (Grøvn, 2008, adaptado). ....	98
Figura 5.1. Modelo “detecção do risco - acção correctiva” (HSE, 1996 <i>in</i> Neto & Kochen, 2000, adaptado). ....	113
Figura 5.2. Lógica de lidar com o risco residual, não evitável <i>a priori</i> (Schubert, 2004, adaptado). ..	114
Figura 5.3. Sistema utilizado pelo MO num túnel (CE 439, 2004, adaptado). ....	117
Figura 5.4. Gestão dos riscos durante a construção através do MO e de acordo com o EC7 (Schubert, 2004, adaptado). ....	118
Figura 5.5. Desenvolvimento e tecnologias para a revitalização do MO (Staveren, 2006, adaptado). ....	120
Figura 5.6. Exemplo de critérios de alerta para um túnel em NATM (CIRIA 185, 1999 <i>in</i> Patel <i>et al.</i> , 2007, adaptado). ....	129
Figura 5.7. Os princípios do PAT (Grasso, 2008, adaptado). ....	134
Figura 5.8. A função do PAT num projecto de um túnel (Grasso, 2008, adaptado). ....	135
Figura 6.1. Proposta de metodologia de gestão do risco geotécnico. ....	141
Figura 6.2. Zonamento geotécnico adoptado ao longo do eixo do túnel. ....	148

## Índice de Quadros

Quadro 2.1. Diferenças entre Risco e Incerteza (Almeida, 2005, adaptado).....	16
Quadro 2.2. Acidentes durante a construção de túneis em Portugal (Seidenfuß, 2006, adaptado)....	33
Quadro 3.1. Descrição das técnicas de identificação de risco. ....	43
Quadro 3.2. Exemplo de uma lista de verificação (United States Coast Guard, 2000a, adaptado).....	45
Quadro 3.3. Vantagens e desvantagens da utilização de listas de verificação (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000a, adaptados). ....	46
Quadro 3.4. Principais perigos geotécnicos (excerto do Anexo I - Quadro I.A.). ....	48
Quadro 3.5. Principais riscos geotécnicos relativos ao método construtivo (excerto do Anexo I – Quadro I.B). ....	49
Quadro 3.6. Alguns símbolos lógicos utilizados na construção de árvores de falhas (CNPGB, 2005, adaptado). ....	51
Quadro 3.7. Vantagens e desvantagens da utilização da FTA (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000b; adaptados).....	53
Quadro 3.8. Vantagens e Desvantagens da ETA (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000c; adaptado). ....	57
Quadro 3.9. Classificação da verosimilhança de ocorrência dos perigos geotécnicos no túnel <i>Nosoud</i> (Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	62
Quadro 3.10. Classificação das consequências da ocorrência dos perigos geotécnicos no túnel <i>Nosoud</i> (Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	63
Quadro 3.11. Classificação dos riscos geotécnicos utilizada para a escavação do túnel <i>Nosoud</i> com três tipos de TBM para maciços rochosos (Khademi, 2006 <i>in</i> Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado). ....	64
Quadro 3.12. Matriz risco para o túnel <i>Nosoud</i> (Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	64
Quadro 3.13. Índices de risco para o túnel <i>Nosoud</i> (Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	65
Quadro 3.14. Perigos geotécnicos e medidas de mitigação mais comuns (Shahriar <i>et al.</i> , 2006 <i>in</i> Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado).....	71
Quadro 3.15. Túneis recentemente construídos com técnicas de escavação inadequadas (Khademi, 2006 <i>in</i> Shahriar <i>et al.</i> , 2008, adaptado). ....	82
Quadro 4.1. Exemplo de uma matriz de alocação do risco (Ashley <i>et al.</i> , 2006, adaptado). ....	96
Quadro 4.2. Exemplo de um conjunto de condições de partilha de riscos (Hoek & Palmieri, 1998, adaptado). ....	99
Quadro 4.3. O conceito de valores de referência e RGR (Staveren, 2006, adaptado).....	101
Quadro 5.1. Gestão do risco entre o Dono de Obra e o Empreiteiro na fase de construção (Eskesen <i>et al.</i> , 2004, adaptado). ....	108
Quadro 5.2. Comparação entre projecto pré-definido e o MO (Patel <i>et al.</i> , 2007, adaptado). ....	116

Quadro 5.3. Estimativa da poupança potencial, utilizando o MO (Maxwell & Naing, 2006, adaptado).	123
Quadro 5.4. Equipamentos de instrumentação e sua função (Bastos, 1998; Amaral, 2006; ITA, 2009, adaptado).	124
Quadro 5.5. Excerto do registo de riscos geotécnicos para um túnel da rede de alta de velocidade Coreana, <i>GB High-Speed Railroad 14-3</i> (Yoo, 2006, adaptado).	133
Quadro 5.6. Excerto de um registo de riscos geotécnicos de um túnel da linha de alta velocidade, <i>Nodo di Bologna</i> , associados ao método construtivo (Grasso, 2008, adaptado).	133
Quadro 6.1. Características gerais da obra.	142
Quadro 6.2. Zonamento geotécnico do maciço.	147
Quadro 6.3. Classificação geomecânica (Bieniawsky, 1989).	148
Quadro 6.4. Sistema Q (Barton, 2002).	149
Quadro 6.5. Parâmetros geomecânicos adoptados no projecto.	149
Quadro 6.6. Identificação dos perigos (excerto do Quadro II.A – Anexo II).	153
Quadro 6.7. Avaliação da verosimilhança da ocorrência dos perigos (Clayton, 2001, adaptado).	154
Quadro 6.8. Acidentes pessoais (AP).	155
Quadro 6.9. Incremento de custos (IC).	155
Quadro 6.10. Atrasos na conclusão das obras (AO).	155
Quadro 6.11. Matriz dos riscos associados aos acidentes pessoais (AP).	157
Quadro 6.12. Matriz dos riscos associados aos custos ou aos prazos (IC ou AO).	157
Quadro 6.13. Análise dos riscos (excerto do Quadro II.B – Anexo II).	157
Quadro 6.14. Aceitabilidade dos riscos.	158
Quadro 6.15. Matriz dos níveis de risco relativa aos acidentes pessoais.	160
Quadro 6.16. Matriz dos níveis de risco relativa aos custos ou aos prazos.	160
Quadro 6.17. Apreciação dos riscos e definição das acções a empreender (excerto do Quadro II.C – Anexo II).	161
Quadro 6.18. Síntese das medidas concretas a implementar (excerto do Quadro II.D – Anexo II).	162
Quadro 6.19. Síntese das medidas efectivamente adoptadas.	163
Quadro 6.20. Síntese da observação e revisão das medidas empreendidas.	164



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

A presente dissertação, inserida no Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), tem como objectivo principal contribuir para a implementação de uma política de gestão dos riscos geotécnicos em Portugal no âmbito da construção de túneis.

Ao longo de muitos anos, a gestão do risco tem sido valorizada em muitos sectores e indústrias, como é o caso do sector financeiro e das indústrias nuclear, química e *offshore*. Contudo, no sector da construção, e em particular em Portugal, esta ainda não foi totalmente incorporada e explorada, apesar das incertezas e dos riscos elevados inerentes àquele sector. A aplicação de uma gestão de risco bem estruturada durante todas as fases da vida da obra, desde a fase dos estudos de viabilidade, até à construção e à exploração, necessita de ser iniciada ou alargada a muitos tipos de obras geotécnicas.

Associado a um risco está sempre um perigo. O perigo geotécnico é todo o condicionante geológico, tais como falhas, dobras, zonas de cisalhamento, diaclases, xistosidade, foliação, cavidades cársticas, aquíferos, etc., que pode interferir, em maior ou menor grau e de modo adverso, na estabilidade, estanqueidade, durabilidade e na geometria final das escavações e estruturas. O conceito mais geral de risco geotécnico neste âmbito está associado à possibilidade de ocorrência de condições geológicas, durante a execução de uma obra, diferentes das previstas nos estudos de projecto e ao método construtivo empregue. É, deste modo, um risco induzido nos trabalhos de construção e nas obras em geral, pelas condições do terreno, onde se verifica a probabilidade de danos em estruturas e pessoas devidos a problemas na interface estrutura-terreno (Longo & Gama, 2004).

Os riscos geotécnicos estarão sempre presentes em qualquer tipo de obra de Engenharia Civil, em maior ou menor grau, dependendo de inúmeras variáveis, sendo as mais importantes: a complexidade geológica do meio a intervir, a qualidade do programa de prospecção e ensaios desenvolvido durante a fase de estudos e o tipo de obra. Apesar dos riscos na construção de obras de Engenharia, nomeadamente em túneis, serem frequentemente ignorados ou subestimados, eles existem. Em todo o mundo tem havido graves falhas na construção de túneis, tendo resultado em consequências indesejáveis, de

diferentes graus de severidade, entre as quais importa destacar perdas de vidas humanas e elevados prejuízos económicos. A maioria destes acidentes deve-se a deficiências no processo de gestão de riscos geotécnicos implementado ou inclusive à sua inexistência.

Os túneis, obras lineares que se podem desenvolver no subsolo muitas vezes ao longo de grandes extensões, ao contrário de outras construções, lidam com parâmetros de variabilidade elevada, devido à potencial heterogeneidade e ao “fraco” conhecimento atingido dos meios geológicos atravessados; daí que o risco inerente a este tipo de obras tenda a ser superior ao de outras. As condições geológicas imprevistas, ou as incertezas associadas às condições do terreno e os problemas geotécnicos que daí derivam, são um dos principais contributos para as falhas que poderão ocorrer nos grandes projectos de obras geotécnicas.

Deste modo, os túneis constituem um caso particular de construção destas obras, com um importante risco de investimento. Daí que não sejam apenas Engenheiros Civis, Engenheiros Geólogos, Geólogos, ou Economistas os interessados naquela gestão, mas também as companhias seguradoras têm grande interesse nesta vertente (Matos & Pinto, 2004). Apesar das inúmeras tentativas de lidar com estas situações, nomeadamente através da incorporação de várias cláusulas nos cadernos de encargos e do papel da fiscalização, os problemas persistem. A solução mais adequada é definir as condições geológicas o mais cedo e com o maior detalhe possível, isto é (*i.e.*), planejar da melhor forma o estudo do maciço para que os eventuais condicionalismos sejam minimizados.

Pelizza (1998 *in* Azevedo, 2008) analisa o problema da previsão de riscos em obras subterrâneas e constata que os acidentes em túneis, cujas causas são referidas como predominantemente geológicas, estão sempre circunscritos a quatro situações:

- ✓ Movimentações do maciço, com consequências restritas à área de construção;
- ✓ Movimentações do maciço com impactes em áreas envolventes à da construção podendo desenvolver eventuais subsidências com forte impacto à superfície;
- ✓ Explosões de rocha; e/ou
- ✓ Uma combinação das três categorias.

Em suma, os riscos geotécnicos em túneis derivam da ocorrência de situações geológicas ou geotécnicas imprevistas, ou cuja dimensão ou consequências excedam o previsto; contudo as suas consequências potenciais são diversas, a saber (Serra *et al.*, 2009):

- ✓ Ferimentos ou fatalidades no pessoal ou em terceiros;
- ✓ Atraso/interrupção de trabalhos;
- ✓ Reformulação do projecto;
- ✓ Necessidade de modificação de métodos ou de reforço de meios em obra;
- ✓ Custos acrescidos;
- ✓ Disputas contratuais;
- ✓ Perdas financeiras próprias;
- ✓ Perdas financeiras de terceiros (por exemplo (*e.g.*): seguradoras ou proprietários de estruturas ou infra-estruturas vizinhas).

Posto isto, é de referir que existem dois tipos de atitudes que podem ser adoptadas face ao risco: há atitudes permissivas, que traduzem posições mais ou menos optimistas relativamente aos perigos e atitudes avessas aos riscos, que traduzem posições mais ou menos pessimistas em relação aos perigos (Kochen, 2009, adaptado). A Figura 1.1 ilustra esta mesma situação aplicada à construção de uma obra subterrânea num maciço rochoso. Assim sendo, os indivíduos com atitudes avessas aos riscos, irão exagerar na adopção de medidas de sustimento (*e.g.*, pregagens); inversamente, aqueles com atitudes permissivas, irão adoptar medidas de sustimento aquém do necessário e conviver com um risco de queda de blocos, ou mesmo de colapso, do túnel. O primeiro caso é economicamente inaceitável, enquanto o segundo ilustrado à direita na Figura 1.1, viola todas as normas de segurança.

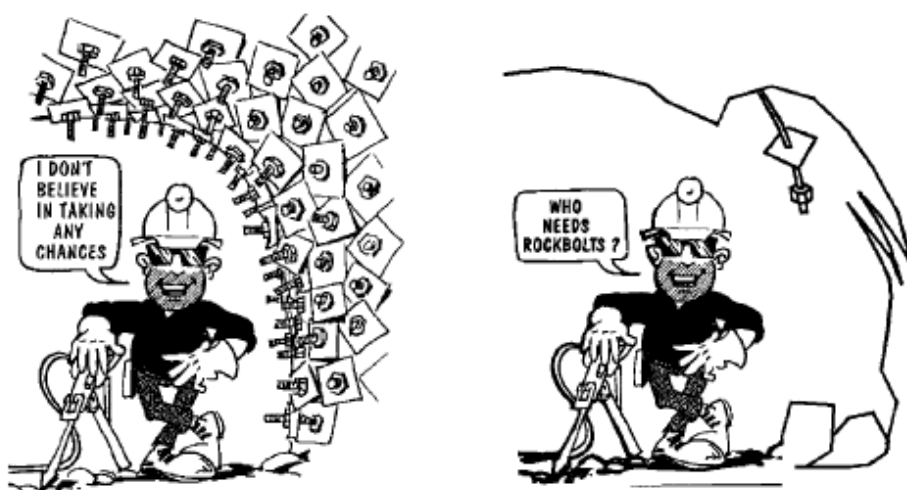


Figura 1.1. A atitude face ao risco (Hoek, 2007).

Como referido, a gestão do risco tem demonstrado o seu valor em muitos sectores, mas a experiência que daí adveio ainda não abrange, completamente, todos os aspectos relativos às obras geotécnicas. Em particular, tem sido muitas vezes subalternizada a importância das pessoas, a consciência dos riscos e a forma de geri-los. Os objectivos da gestão do risco devem ser definidos segundo uma ordem de relevância relativa. As prioridades dependem da entidade que está a realizar a avaliação em cada fase da obra. Por exemplo, um Empreiteiro preocupar-se-á apenas com os riscos que encontrará durante a construção, enquanto o Dono de Obra poderá estar interessado, não só nos riscos que ocorrerem nessa fase, mas também naqueles que permanecerão na sua posse aquando da ulterior exploração.

A gestão do risco geotécnico é um processo global, sistemático, de identificação, avaliação, mitigação e controlo. O objectivo principal da sua implementação é assegurar que os riscos sejam reduzidos para níveis aceitáveis e geridos da forma mais eficiente (Figura 1.2), a fim de evitar as consequências que possam surgir, da ocorrência de um evento adverso. Para ser efectivo, em termos de redução dos impactes e identificação das oportunidades, este processo deve ser desenvolvido o mais precocemente possível. Para tudo isto, é necessário que os seguintes objectivos sejam cumpridos (Eskesen *et al.*, 2004):

- ✓ Identificar os riscos;
- ✓ Identificar medidas para eliminar ou mitigar os riscos;
- ✓ Implementar aquelas medidas, sempre que economicamente possível, de acordo com os objectivos específicos de redução de risco ou a legislação em vigor.

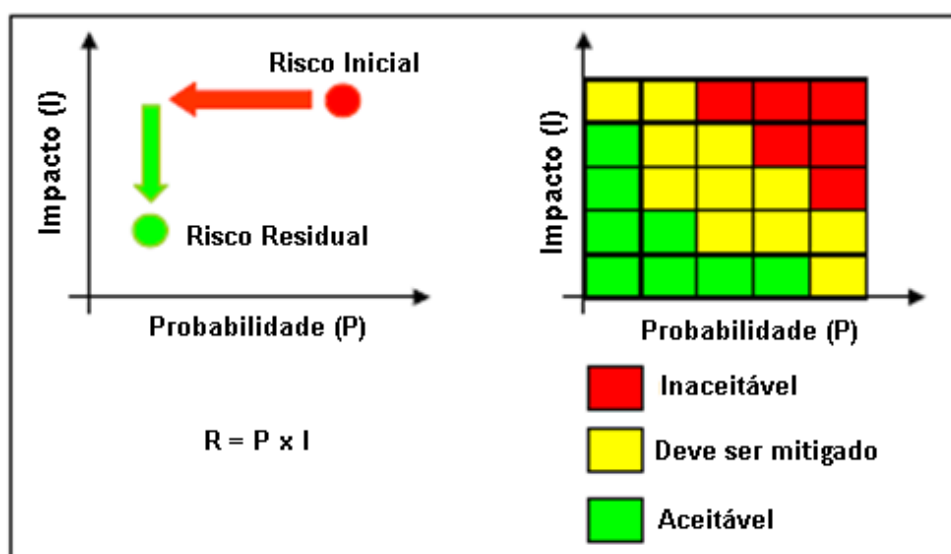


Figura 1.2. O objectivo da gestão do risco (Grasso *et al.*, 2006, adaptado).

Como é sabido, nas fases de projecto e construção, o risco associado nunca é completamente evitável. Deste modo, a realização da obra nunca pode ser considerada como um evento pré-determinado. Apesar disto, o projecto de uma obra subterrânea, tradicionalmente, segue uma abordagem iterativa, baseada num modelo de gestão indirecta dos riscos potenciais, através de uma série de decisões preconizadas.

É assim útil, neste tipo de obras, estabelecer padrões mínimos de avaliação de riscos e procedimentos para a correcta gestão dos mesmos. Para tal, é importante definir claramente as responsabilidades das partes envolvidas, de modo a reduzir as probabilidades de perdas e o número e extensão das disputas contratuais. É necessário que Engenheiros, Projectistas e Empreiteiros identifiquem os riscos em cada empreendimento, procedam à sua qualificação e quantificação, elaborem planos e estratégias para a gestão destes riscos, e adoptem processos de observação e controlo dos mesmos durante toda a fase de construção da obra e ulterior entrada ao serviço.

Na última década, foi desenvolvida e aplicada com sucesso, uma abordagem integrada, onde a gestão eficiente do risco é combinada com uma abordagem flexível nas fases de projecto e construção. Essa abordagem consiste na implementação de um Plano de Gestão do Risco (PGR), uma metodologia de gestão de risco forte e transparente feita de passos claramente identificados, que visa não apenas gerir os riscos, mas também garantir a segurança, qualidade, custo e limites de duração da obra (Grasso *et al.*, 2007). Além disto, o PGR deve ser dinâmico, continuamente revisto e actualizado devendo, no caso específico de túneis, essa revisão e actualização ser diárias. Ao aplicar um PGR deve ter-se em mente o seguinte (Grasso *et al.*, 2006):

- ✓ Nenhum projecto de construção é livre de risco. O risco pode ser gerido, minimizado, partilhado, transferido ou simplesmente aceite, mas não pode ser ignorado (Clayton, 2001 *in* Grasso, *op. cit.*);
- ✓ Na realidade, nem todos os riscos associados à construção subterrânea podem ser totalmente evitados ou mitigados;
- ✓ A gestão de risco não irá remover todos os riscos da obra;
- ✓ Para cada risco, é necessário determinar o nível de aceitação;
- ✓ O PGR deve ser integrado em todas as fases do desenvolvimento de uma obra;

- ✓ O Dono de Obra e o Gestor do projecto devem reconhecer que certos riscos permanecerão a cargo do Dono de Obra. Este risco deve ser permitido na estimativa de tempo e custo por parte do mesmo.

As obras já concluídas e mais conhecidas a nível mundial onde o PGR foi aplicado referem-se a túneis urbanos construídos com métodos mecanizados (Linha 1 do Metro de Turim, Itália; Metro do Porto, Portugal; Linha de Alta Velocidade em Bolonha, Itália). Os benefícios da implementação do PGR no âmbito daquelas obras são inúmeros, *e.g.*, construção dentro dos limites de orçamento, inexistência de acidentes, entre outros. (Grasso *et al.* 2007).

A gestão dos riscos é uma metodologia cíclica composta por diversas etapas, aplicável transversalmente a todo o processo de concepção, construção e exploração de túneis. A Figura 1.3 ilustra muitíssimo bem as etapas de gestão do risco intrínsecas ao PGR.

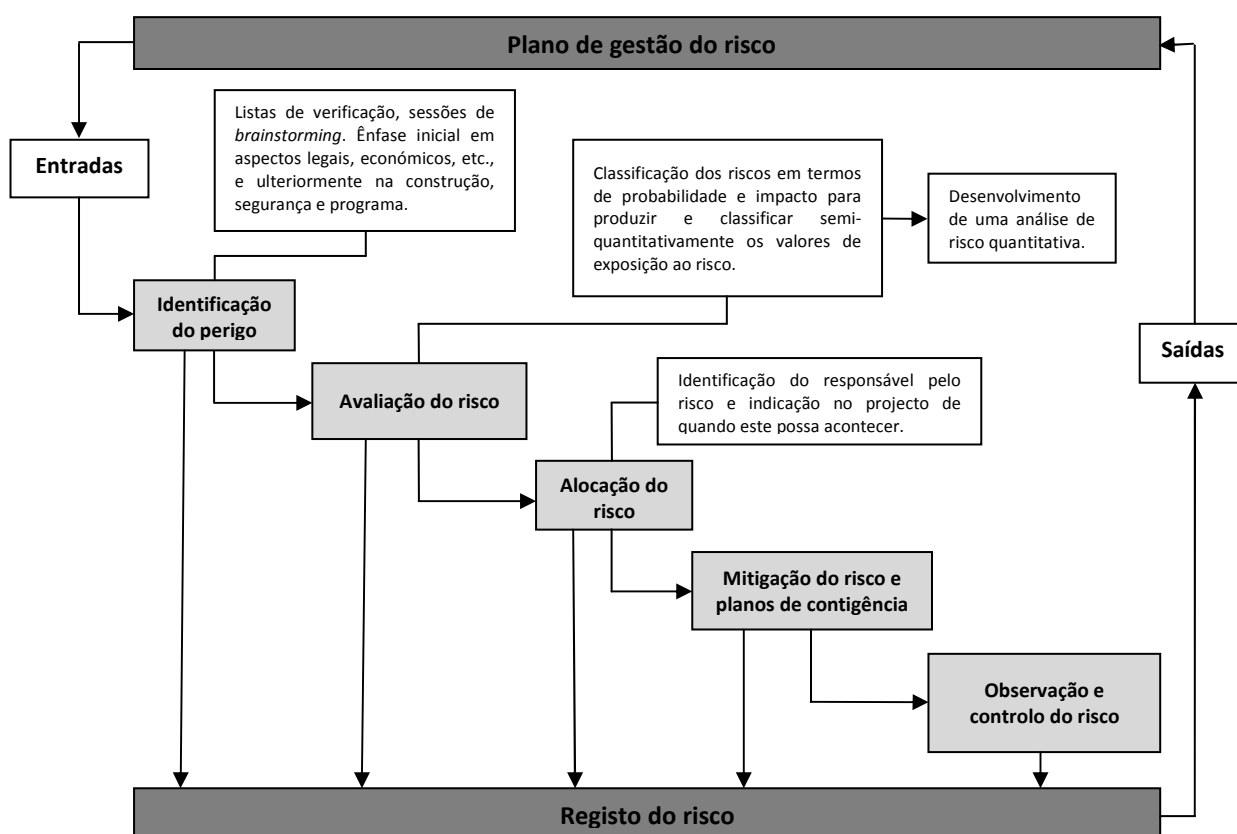


Figura 1.3. Plano de gestão do risco (Powell & Silvertown, 2003, adaptado).

O âmbito da presente dissertação irá incidir sobre as principais etapas que devem ser empreendidas durante a fase de construção, com particular ênfase na observação<sup>1</sup> e

<sup>1</sup> O termo observação deve ser entendido como o conjunto das actividades de monitorização (por medições realizadas com instrumentos e dispositivos) e de inspecção visual dos riscos.

controlo dos riscos naquela fase. No entanto, as etapas de identificação, avaliação (análise e apreciação), mitigação e alocação dos riscos geotécnicos, não serão esquecidas, tendo em conta que é fundamental estimar os riscos associados a este tipo de projectos, averiguar a sua aceitabilidade, incrementar acções correctivas e partilhar responsabilidades pelo risco, defendendo que todas estas etapas deverão ser aplicadas e constantemente actualizadas durante a fase construtiva.

A identificação e avaliação dos riscos geotécnicos são as principais etapas do procedimento a adoptar (Caspurro & Gomes, 2000). A identificação dos riscos associados a um determinado projecto é decisiva para a sua análise, pois todo o processo ulterior evoluirá de acordo com os riscos identificados nesta fase. Devem ser desenvolvidos esforços para identificar o maior número possível de riscos associados à obra, o que exige a participação de diversos especialistas, de preferência com experiência de projecto, construção e exploração de obras da mesma tipologia (*op. cit.*). A avaliação dos riscos envolve a determinação da probabilidade de ocorrência, as consequências dessa ocorrência, a importância relativa face a outros riscos e a determinação da vulnerabilidade do sistema ao risco. Esta fase resulta na atribuição de um grau ao risco, ou seja, na sua classificação, e consequente apreciação do risco através da análise do seu grau de aceitabilidade/tolerabilidade.

Após a avaliação dos riscos devem ser definidas e implementadas as medidas correctivas, necessárias para evitar o risco ou para o reduzir a um nível aceitável, considerando que não se justifica, do ponto de vista económico, a sua redução para um nível mais baixo (*op. cit.*).

Um ponto que vale a pena abordar, que é intrínseco ao processo de gestão, é a alocação do risco. Actualmente e neste contexto de riscos relacionados com as condições do terreno, a partilha do risco geotécnico entre o Dono de Obra e o Empreiteiro assume uma importância primordial nos contratos de obras subterrâneas. A descrição das condições do terreno por parte do Dono de Obra permite ao Empreiteiro o planeamento dos equipamentos e procedimentos a adoptar, e é um factor importante na estimativa das quantidades de trabalho e na elaboração do próprio contrato. Noutras palavras, a repartição do risco entre o Dono de Obra e o Empreiteiro tem uma relação directa com o contrato de contingência, como parte da proposta do Empreiteiro. Na fase de concurso, a gestão de risco pode ainda ser aplicada para avaliar as diferentes propostas e custos.

A redução do risco para um nível aceitável poderá passar, para além da adopção de medidas correctivas, pela implementação de um programa de observação e controlo que permita gerir os riscos residuais. Ainda segundo Caspurro & Gomes (2000), a planificação de um sistema de observação e a definição de critérios de alerta, definidos de acordo com os riscos identificados, estão entre as medidas mais eficazes para o seu controlo.

Finalmente, depois de todas estas etapas, é necessário que a informação seja devidamente arquivada e transferida para a próxima fase. Isto pode ser efectuado através do registo de riscos (RR). Segundo a *British Tunnelling Society* (BTS, 2003), esses registos são documentos em constante evolução pelo que devem ser continuamente revistos, e corrigidos sempre que necessário. Todas as informações importantes provenientes das etapas anteriores devem ser preparadas, num formato adequado, e ser mobilizadas para a próxima fase da obra, de modo a serem disponibilizadas para eventuais intervenções que se venham a revelar necessárias.

Os factores de risco que não podem ser evitados durante a fase de projecto representam os factores de risco residual (*i.e.*, o risco remanescente após ter sido implementado um programa de medidas para a sua mitigação), que precisam ser geridos durante a construção. Nesta mesma fase, a gestão funciona como um instrumento para controlar os desvios esperados pelo Projectista no comportamento do sistema e para minimizar os danos, no caso de esses desvios virem a acontecer. O risco residual requer uma metodologia que garanta a implementação dos procedimentos para a identificação atempada de desenvolvimentos desfavoráveis e o estudo de contra medidas para a sua atenuação. Para tal, é importante que estes riscos sejam comunicados com antecedência ao Empreiteiro. É necessário também priorizar, dependendo da circunstância, a minimização dos riscos com elevado impacto, mas de baixa probabilidade de ocorrência comparativamente com os riscos de maior probabilidade, mas de impacto mais reduzido.

Reduzir o risco inicial e, principalmente, a gestão do risco residual (risco aceitável ou riscos imprevistos ou riscos imprevisíveis) torna-se o ponto de focagem do PGR em túneis. Em suma a gestão do risco residual é obtida através da definição de (Chiriotti *et al.* 2004):

- ✓ Regras e responsabilidades;
- ✓ Comunicação e caminhos de decisão;
- ✓ Formação dos operadores;



- ✓ Definição de parâmetros-chave para verificar a correspondência entre as previsões e os dados de construção;
- ✓ Plano de segurança;
- ✓ Verificação independente;
- ✓ Supervisão da construção e monitorização.

Contudo, a gestão do risco não garante que a obra seja concluída dentro do prazo e do orçamento estipulados, pois a incerteza é um apanágio inerente à construção subterrânea. A eficácia completa do PGR é alcançada se o método de escavação apropriado é acompanhado, diariamente, por pessoal experiente e pela implementação de procedimentos para orientar todos os processos de construção relevantes, governar os acontecimentos chave e resolver todas as potenciais anomalias com um plano de acção apropriado. Assim sendo, uma avaliação de risco correcta e válida, deve e pode ser obtida, somente com uma correcta compreensão do projecto e método construtivo.

Para um PGR ter sucesso deve obedecer aos requisitos abaixo indicados (Kochen, 2009):

- ✓ Revisão e avaliação dos maciços terrosos/rochosos ocorrentes nas escavações subterrâneas, considerando o método construtivo seleccionado;
- ✓ Revisão e avaliação das incertezas e variações nas condições geológico-geotécnicas identificadas no projecto e método construtivo;
- ✓ Implementação de planos de prospecção geotécnica adicional, caso necessários;
- ✓ Cálculos de estabilidade das escavações subterrâneas, e avaliação das necessidades da execução de melhoramentos do terreno;
- ✓ Elaboração de um RR, contendo os riscos identificados, em relação às obras subterrâneas, estimativa da sua probabilidade de ocorrência e impactes, bem como as medidas aconselhadas de projecto e construção, para reduzir os riscos iniciais a níveis aceitáveis;
- ✓ Verificação e adequação da monitorização geotécnica, para avaliar o comportamento das obras subterrâneas, dos maciços e do meio adjacente.

Um aspecto importante a realçar, para que um empreendimento de uma obra subterrânea seja bem sucedido nas suas diversas fases (projecto, construção e exploração), diz respeito ao equilíbrio que é necessário existir, por um lado, entre a gestão do risco (condições geológicas, projecto estrutural, métodos de melhoramento de terrenos) e, por outro lado, a

gestão do empreendimento (supervisão, formação, observação da obra, relação Dono de Obra – Empreiteiro, qualidade da mão-de-obra e interpretação dos dados da monitorização). A Figura 1.4 ilustra este conceito de equilíbrio entre gestão do empreendimento e gestão de riscos. Na prática a separação destes dois conceitos não ocorre, uma vez que eles são interdependentes.

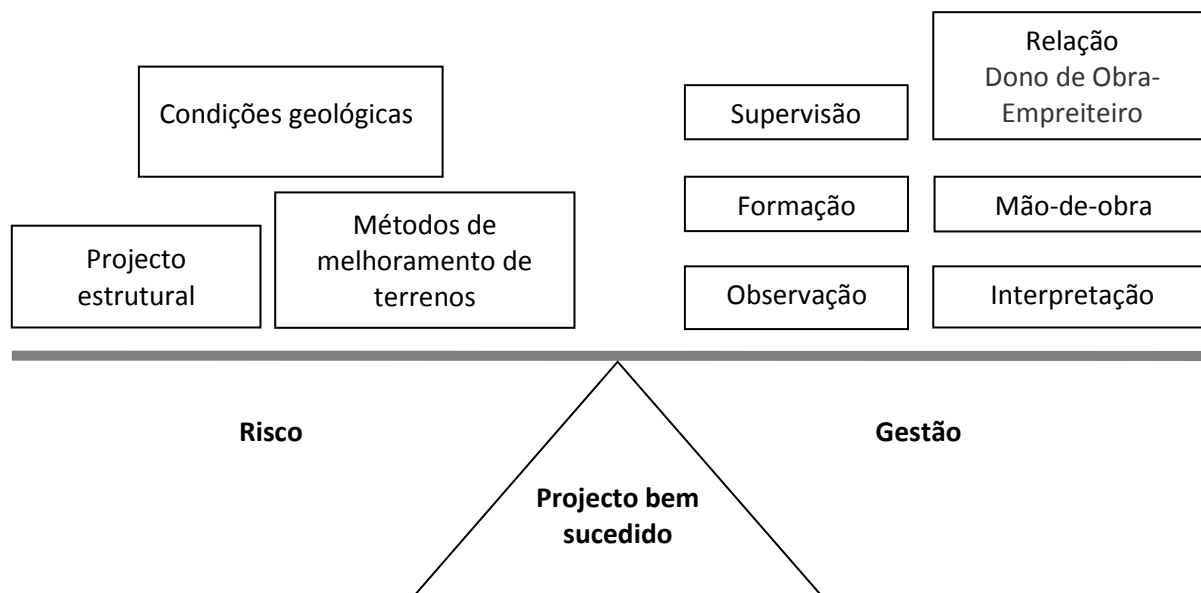


Figura 1.4. Equilíbrio entre gestão do empreendimento e gestão do risco (Grasso *et al.*, 2008, adaptado).

Em suma, a gestão do risco é um processo sistemático que visa (ITIG, 2006):

- ✓ Identificar os perigos e riscos associados, através da respectiva avaliação, com impacto na obra em termos de custos e de programa, incluindo aqueles com terceiros;
- ✓ Quantificar esses riscos e as respectivas implicações nos custos;
- ✓ Identificar e planear acções pró-activas, para eliminar ou mitigar os riscos;
- ✓ Identificar métodos a utilizar para o seu controlo;
- ✓ Alocar os riscos às várias partes do contrato.

Até há pouco tempo, as técnicas de gestão de riscos não assumiam relevância especial na avaliação de obras subterrâneas e de outras obras geotécnicas. A situação modificou-se e as análises de risco têm vindo a ser implementadas em grandes projectos internacionais. Em Portugal, ainda existe pouca aplicação formal dos processos de gestão de risco para estruturas subterrâneas. Contudo, com os empreendimentos em curso (túneis em novos aproveitamentos hidroeléctricos ou para reforços de potência) e com os que se anunciam, ligados quer às redes de transporte rodoviário e ferroviário, quer às redes de abastecimento

de água, exigir-se-á a construção de um número considerável de novos túneis e, consequentemente, a ocupação crescente do espaço subterrâneo. Perspectiva-se, assim, que o desenvolvimento de estudos de risco geotécnico para túneis venha a adquirir uma cada vez maior necessidade e relevância no país.

## 1.2 OBJECTIVOS

Construir obras subterrâneas, minimizando a probabilidade de ocorrência de acidentes, limitando perdas e danos que possam influenciar de forma onerosa o tempo e os custos de realização e garantindo, quando em serviço, a segurança dos operadores e do público, depende da capacidade da Engenharia de identificar, atempadamente e de forma estruturada e sistemática, as incertezas peculiares da obra e a variabilidade das mesmas, bem como os potenciais eventos e processos críticos nas suas diferentes fases de evolução, quantificar o consequente risco e definir as soluções, quer de projecto quer construtivas, capazes de reduzir o risco para níveis de aceitabilidade adequados à obra em referência (Chiriotti *et al.*, 2004).

Desta maneira, é necessária a constante evolução e melhoramento de técnicas e metodologias de gestão de risco em túneis.

É este o sentido que a presente dissertação pretende seguir. Deste modo, os objectivos que se propõe atingir são os seguintes:

- ✓ Salientar a importância e fomentar a aplicação das avaliações de risco na construção de túneis em Portugal;
- ✓ Proporcionar um conjunto de novas orientações para esta prática e aprofundamento das já existentes;
- ✓ Elaborar uma síntese e actualização do estado da arte, contemplando alguns conceitos e princípios fundamentais;
- ✓ Contribuir para a identificação de perigos geotécnicos potencialmente danosos no contexto da construção de túneis;
- ✓ Exemplificar o conteúdo de uma lista de verificação, para identificar o perigo geotécnico, descrever as suas características principais e definir meios de detecção para a sua eventual ocorrência;

- ✓ Dar a conhecer algumas técnicas de avaliação de risco quantitativas e qualitativas, aplicando estas últimas a um caso de estudo hipotético;
- ✓ Recomendar a adopção de medidas e acções que reduzam ou evitem o risco, logo na fase de projecto, prolongando-as para a fase de construção e de exploração de modo a garantir a segurança de forma contínua;
- ✓ Sugerir o estabelecimento de prioridades relativamente às medidas de redução de risco;
- ✓ Descrever alguns aspectos contratuais e recomendar a partilha de riscos entre todas as entidades intervenientes;
- ✓ Rever os métodos para observar e controlar o risco residual durante a construção;
- ✓ Aplicar os conhecimentos a um caso de estudo hipotético, servindo de modelo para facilitar a aplicação dos processos de gestão de riscos geotécnicos em futuras obras de túneis.

Através de todos os pontos anteriormente mencionados pretende-se contribuir para implementar em Portugal um método para a detecção de riscos que seja ágil, eficiente e que permita identificar eventos anómalos logo no seu início, assim como evitar que os riscos aumentem, impedindo que seja necessário desenvolver esforços maiores para o seu ulterior controlo, ou mesmo evitar possíveis acidentes em obra.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução à temática abordada na presente dissertação, incluindo um enquadramento geral do tema, e uma descrição sucinta dos objectivos pretendidos com este estudo.

No Capítulo 2 são distinguidos dois conceitos, risco e incerteza. São definidos os conceitos gerais envolvidos na gestão de riscos em túneis, bem como os correspondentes princípios fundamentais. Apresenta-se uma actualização do estado efectivo em que se encontra a temática referente à presente dissertação. É dada ênfase ao impacto que o risco geotécnico tem neste tipo de obras geotécnicas. São apresentados alguns casos históricos de acidentes em túneis e, por fim, são relacionadas e esquematizadas as etapas de gestão do risco

consideradas por alguns autores especialistas nesta matéria, com as fases de obra, bem como um exemplo de sucesso da aplicação destes processos.

No Capítulo 3 são descritos com maior pormenor as etapas inerentes ao processo de gestão do risco. São apresentados e sintetizados os principais métodos e técnicas de identificação e avaliação de riscos em túneis. Além disso são apresentadas as estratégias para mitigar o risco, e debatida a importância da prospecção geológico-geotécnica na fase de projecto e na fase de construção e da selecção do método construtivo mais apropriado, como potenciais redutores de risco. Este último demonstrado através de um caso prático de aplicação.

No Capítulo 4 são apresentados aspectos contratuais, tipos de contrato, funções e responsabilidades das partes intervenientes. Faz-se referência à forma de lidar com o risco geotécnico dentro desses contratos através da partilha do risco, demonstrado através do método norueguês e, por fim, são descritas as funções do Relatório Geotécnico de Referência (RGR) no âmbito da gestão do risco geotécnico.

No Capítulo 5 são apresentados aspectos relativos à gestão do risco durante a fase construtiva de um túnel. Para além de certas generalidades, são descritas as responsabilidades das partes intervenientes, é dada ênfase à observação e controlo do risco residual, através do uso do Método Observacional (MO). São referidos os equipamentos de monitorização mais usuais nestas obras, é efectuada uma breve referência ao registo dos dados recolhidos e à sua comunicação, e a definição de níveis de alerta e de alarme. Finaliza-se este capítulo com uma descrição sumária de duas ferramentas de controlo do risco: o RR e o Plano de Avanço do Túnel (PAT).

No capítulo 6 são implementados todos os conhecimentos adquiridos a um caso de estudo hipotético.

O Capítulo 7 contempla as considerações finais do presente trabalho e recomendações para futuros desenvolvimentos no âmbito da temática abordada.

Finalmente encontram-se as referências bibliográficas consultadas para a execução desta dissertação e anexos que a complementam.



## 2 ESTADO DA ARTE

No presente capítulo, definem-se alguns conceitos e princípios fundamentais relacionados com a temática, procede-se a uma revisão do estado actual dos processos de gestão de risco em túneis, tanto a nível internacional como nacional. É ainda dado ênfase ao impacto que o risco geotécnico tem neste tipo de obras geotécnicas. São apresentados alguns casos históricos de acidentes em túneis ocorridos nos últimos anos e, por fim, são relacionadas e esquematizadas as etapas de gestão do risco consideradas por alguns autores especialistas nesta matéria com as fases de obra, bem como um exemplo de sucesso da aplicação da metodologia de gestão do risco geotécnico a um túnel durante a construção.

### 2.1 CONCEITOS E PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

#### 2.1.1 Incerteza e risco

Na Geotecnia a incerteza está presente em todas as fases de obra, desde a caracterização do respectivo local, passando pela análise e projecto até à tomada de decisões e construção. A incerteza é inerente ao terreno. A influência da incerteza sobre a fiabilidade de um dado projecto geotécnico pode ser significativa e, frequentemente, é reflectida no colapso de estruturas dimensionadas para serem seguras (Costa, 2005). Embora existam grandes avanços na aplicação da gestão de risco e elaboração de projectos baseados na fiabilidade, ainda subsistem diversas origens de incerteza que não podem ser quantificadas facilmente.

A variabilidade espacial dos materiais geológicos requer que o Engenheiro faça extrapolações a partir de furos de sondagens e amostragens pontuais. Tal extrapolação envolve um grau de incerteza significativo (*e.g.*, “anomalias geológicas” presentes num local não detectadas durante a prospecção geotécnica do mesmo). Desta maneira são introduzidos erros na estimativa das propriedades dos materiais quando o número de amostras é insuficiente, quando os métodos de ensaio não determinam as propriedades de forma precisa (*e.g.*, resistência) e quando os procedimentos de ensaio contiverem erros aleatórios (*op. cit.*).

Nesta fase torna-se essencial distinguir o conceito de risco do de incerteza (Quadro 2.1).

**Quadro 2.1. Diferenças entre Risco e Incerteza (Almeida, 2005, adaptado).**

Autor	DEFINIÇÕES	
	INCERTEZA	RISCO
Flanagan & Norman (1993)	Situação em que não existem dados históricos ou reais que possam estimar a probabilidade da ocorrência de um determinado evento. Assim sendo, ela será estimada pela opinião de especialistas baseada nas informações disponíveis.	Situação em que os dados existem e são mensuráveis.
Raftery (1994)	Impossível de estimar, fazendo-se apenas a descrição de um determinado cenário onde não é possível a quantificação, baseada em opiniões, resultando na análise de uma probabilidade subjectiva.	É quantificável, pode-se avaliar estatisticamente através do cálculo da probabilidade objectiva, baseada na análise de dados reais ou históricos.
Kerzner (1998)	Não existe possibilidade de avaliar a probabilidade.	Determinado através da probabilidade da sua ocorrência.
Kassai <i>in</i> Rodrigues (2001)	Risco que não pode ser avaliado.	É uma incerteza que pode ser medida.

Fica assim claro que na Geotecnia como em outras áreas, não se encontra uma definição unívoca de risco e incerteza.

Os riscos são eventos sobre os quais se pode reflectir em termos de probabilidade de ocorrência e grau de impacto e quantificar, de algum modo; enquanto a incerteza pode entrar no domínio do imprevisível (algo que não se conhece de todo), daquilo sobre o qual não se podem elaborar previsões; é a falta de conhecimento para estimar um resultado passível de variação, um resultado que não pode ser precisamente determinado, embora a tendência actual é, no entanto, a de atribuir às incertezas uma descrição sob a forma probabilística, tomando valores entre 0 (impossibilidade) e 1 (certeza). De forma simplificada o risco de um evento adverso pode ser estimado através do produto entre a sua probabilidade de ocorrência e as respectivas consequências (Staveren, 2006).

Para exemplificar de forma simples e esclarecer estes conceitos, Kochen (2009) refere o caso de um Engenheiro que vai de casa até ao escritório da empresa onde trabalha. Molhar-se com a água da chuva durante o percurso de casa até ao escritório, é um risco. A probabilidade de isto ocorrer é o número de dias que choveu, no horário de ida para o trabalho, durante o ano transacto, dividido por 365. As consequências (ou impactes) deste evento são: contrair gripe, incómodo, desconforto durante o trabalho. As possíveis escolhas para este evento são: aceitar o risco (é irrelevante ficar molhado e não gostar de usar



chapéu de chuva); ou implementar um conjunto de medidas que minimizem as hipóteses de ser afectado pelo evento, caso ele ocorra.

Segundo Morgan & Henrion (1990 *in* Estrela, 2008), não há risco se não houver incerteza; todavia poderá haver incerteza sem haver risco. De acordo com Estrela (*op. cit.*) não faz sentido considerar-se como risco um evento que tenha probabilidade de ocorrer, mas que tenha impacto nulo, ou o inverso. Importa referir que, apesar de a generalidade dos autores caracterizarem o risco como uma ameaça, este também pode e deve ser encarado, como uma oportunidade. Na indústria de construção, o gestor poderá tirar partido desta visão, porque será apenas em actividades com risco associado que poderá reduzir a duração estimada para a obra, procurando atingir uma previsão mais optimista.

Na avaliação de riscos na maioria das vezes, as probabilidades e consequências são incertas. A incerteza é dependente do tempo. Uma situação incerta hoje poderá ulteriormente ser conhecida com certeza absoluta. O resultado do lançamento de um dado é uma condição incerta que, alguns segundos depois, passa a ser um facto. Antes da construção de um túnel, há muitos factores de incerteza relacionados com as condições do terreno ao longo do respectivo alinhamento, mas uma vez que seja concluído o túnel, estas condições são conhecidas e deixam de ser incertas.

Como referido, as condições de terreno imprevistas constituem a principal causa de atrasos e de derrapagens orçamentais em todo o mundo. A diferença entre os dados disponíveis através de relatórios geotécnicos e as condições reais do terreno a encontrar num local são bastante frequentes e exigem grandes esforços para a gestão dos riscos.

Segundo Flores (2006), em obras geotécnicas no geral e em particular nos túneis, é comum encontrar fontes de incerteza relacionadas com os seguintes aspectos:

- ✓ Variação espacial e efeito de escala (heterogeneidade do maciço; falta de concordância entre os ensaios de campo e laboratoriais);
- ✓ Prospeção geotécnica limitada;
- ✓ Erros de medição (falta de exactidão dos instrumentos);
- ✓ Estimativas subjectivas;
- ✓ Natureza aleatória das cargas estáticas e dinâmicas;
- ✓ Condições geoambientais (pressão da água, erosão, variações do nível freático, etc.);
- ✓ Validade e precisão dos modelos geomecânicos;

- ✓ Utilização de correlações empíricas;
- ✓ Erro humano.

Ao longo dos anos foram-se desenvolvendo técnicas de análise e incorporação das incertezas, de forma a introduzir o seu possível efeito no processo decisivo, que podem ser distinguidas pela forma de abordagem do problema. Correntemente, numa obra geotécnica, quando não existe o conhecimento desejado do maciço é usual recorrer à consulta de especialistas. Os especialistas tendem a produzir boas estimativas de valores médios, medianos e tendências, sendo a média da opinião desses vários especialistas e a gama de variação dos resultados estabelecida por eles, eficaz para a modelação geotécnica do terreno e para a resolução de problemas que eventualmente possam ocorrer. Porém, os especialistas tendem a ser demasiado confiantes, tendendo a subestimar as incertezas nas suas estimativas (Costa, 2008).

### 2.1.2 Outros

Dois dos conceitos estreitamente relacionados com a definição de risco são os de **perigo** e **vulnerabilidade**.

O **perigo** corresponde a uma fonte de eventuais danos ou a uma situação com potencial para provocar eventos adversos ou consequências indesejáveis (CNPGB, 2005). De acordo com Powel & Silverton (2003), normalmente o enfoque reside sobre as ameaças imprevisíveis, tais como as condições geológicas, que muitas vezes são difíceis de estudar e prever problemas ao longo do alinhamento de um túnel. É muitas vezes conveniente para os Projectistas e Empreiteiros admitirem que a maioria dos problemas advém de condições imprevistas, e que são ignoradas pelos mesmos, daí que seja essencial o constante controlo e correcção das deformações ocorridas em obra.

A **vulnerabilidade** é o conjunto de factores que determinam a magnitude dos danos que um evento adverso pode criar, caso se concretize (Longo & Gama, 2004). Também pode ser definida como a extensão ou capacidade de elementos, como pessoas e equipamentos em túneis sujeitos ao risco, para responder a um perigo ou às suas consequências. Na construção de túneis, riscos geotécnicos como a abrasividade e dureza da rocha, instabilidades das nascentes, hasteais ou tecto do túnel e o afluxo de água, aumentam a

vulnerabilidade das secções, especialmente quando vários eventos se conjugam e afectam o mesmo local. A quantificação da vulnerabilidade dos elementos em risco, como um passo na avaliação do risco, obtém-se fazendo uma avaliação do grau de danos que possam resultar da ocorrência de um perigo de determinado tipo e magnitude.

Existem também processos e princípios aos quais o conceito de risco está ligado e é necessário defini-los adequadamente. Um deles é o **princípio ALARP** - *As Low As Reasonably Possible* (tão baixo quanto razoavelmente possível), que estipula que um risco que esteja dentro do intervalo de tolerabilidade (*i.e.*, o intervalo onde o risco é superior ao limite aceitável e inferior ao limite intolerável (ver 3.2.2)) é aceitável se e só se a sua redução for impraticável ou se os custos das medidas estruturais ou não estruturais conducentes à sua redução forem desproporcionados em relação ao benefício (Pimenta, 2008).

Tal como o termo risco, também o de **gestão de riscos** tem muitas definições. Como anteriormente referido, este é um processo sistemático global que consiste na aplicação de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de identificação, avaliação, mitigação e controlo de riscos. Engloba também a realização de análises custo/benefício das medidas tendentes à redução do risco. Para Staveren (2007), a gestão de riscos não é apenas um pré-requisito para tentar evitar desastres nas construções, mas também para minimizar as despesas dos Donos de Obra e melhorar os resultados financeiros das empresas.

Um processo já referido mas que agora se define é a **identificação de riscos**. Esta pretende assegurar que todas as causas, mesmo as aparentemente menores, com potencial directo ou indirecto para originar um processo (a curto ou a longo prazo) capaz de conduzir a um acidente significativo, foram identificadas (Caldeira, 2002). De uma maneira geral, esta etapa inclui: a descrição, em traços gerais, do problema em análise; a identificação genérica dos perigos; a indicação de quem e/ou do quê se pode encontrar em risco; a identificação dos possíveis constrangimentos à resolução do problema (Santos *et al.*, 2008).

A **avaliação de risco** consiste numa análise integrada dos riscos inerentes a um sistema ou a um projecto e o seu significado num contexto apropriado. Ela envolve a análise e a apreciação de riscos e possibilita a tomada de decisões no decurso de um processo de gestão. Esta avaliação poderá impor a adopção de medidas tendentes à sua redução

(Caldeira, 2002). A avaliação dos riscos envolve a determinação de cinco aspectos principais (Kliem & Ludin, 1997 *in* Caspurro & Gomes, 2000):

- ✓ Probabilidade de ocorrência;
- ✓ Frequência de ocorrência;
- ✓ Consequências da ocorrência e respectivos impactes;
- ✓ Importância relativa face a outros riscos;
- ✓ Vulnerabilidade do sistema ao risco.

Por **análise de risco** entende-se o conjunto de procedimentos tendentes à identificação dos acontecimentos indesejáveis que conduzem à sua materialização, à análise dos mecanismos que desencadeiam esses eventos, às respostas das estruturas e às respectivas consequências, bem como à estimativa da extensão, da amplitude e da probabilidade da ocorrência de perdas (Caldeira, 2002). Os objectivos das análises de risco estão, essencialmente, relacionados com as avaliações das condições de segurança das obras e do impacto na Sociedade da respectiva rotura.

A **apreciação de riscos** é o processo de ponderação e julgamento do significado dos riscos avaliados nas análises de riscos (CNPGB, 2005). Os resultados da análise do risco entram no processo de decisão, explícita ou implicitamente, formulando-se considerações sobre a importância relativa dos riscos calculados e das respectivas consequências sociais, ambientais, económicas e outras, com o objectivo de identificar e analisar o leque de alternativas que se colocam no âmbito da gestão dos riscos (*op. cit.*).

A **mitigação do risco** é a aplicação selectiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para reduzir a verosimilhança<sup>2</sup> de uma ocorrência ou das suas consequências adversas ou ambas (*op. cit.*).

O **controlo do risco** é a implementação e a imposição de medidas para manter ou reduzir o risco e a reavaliação periódica da sua eficácia (*op. cit.*).

---

<sup>2</sup> A *verosimilhança* é um termo utilizado para descrever, qualitativamente, a probabilidade ou a frequência. Em termos matemáticos é definida como a probabilidade condicional de um resultado face a um conjunto de dados, hipóteses e informações (Santos, 2006).

## 2.2 SITUAÇÃO ACTUAL

### 2.2.1 Internacional

Internacionalmente, o processo de gestão de risco tem conquistado uma maior relevância para tratar as incertezas relacionadas com o comportamento das diversas obras geotécnicas. A sua aplicabilidade é cada vez maior em obras tais como: barragens, túneis, fundações em geral, muros de contenção, canais, condutas e vias de comunicação rodovias ou ferroviárias.

Após vários acidentes de grandes dimensões no sector da construção de túneis, ocorridos sobretudo durante a década de noventa, nomeadamente, os colapsos de túneis em Munique (*Munich Metro*, 1994), em Inglaterra (*Heathrow Express Link*, 1994) e na Turquia (*Anatolia Motorway*, 1999), os responsáveis pela gestão do risco criticaram severamente a adequabilidade da metodologia e critérios utilizados então pelo que, nos últimos anos, tem havido uma concentração crescente de investigação em torno deste aspecto. Grande parte dessa evolução tem sido impulsionada pelas empresas internacionais de seguros dos grandes projectos de construção de túneis, que registaram perdas importantes devido aos acidentes ocorridos e que têm sido significativamente superiores aos prémios cobrados. Ao invés de optar por sair do mercado, ou aumentar drasticamente os prémios, a decisão foi melhorar a gestão de riscos naquele tipo de estruturas.

Para tal, as seguradoras criaram um *Joint Code of Practice* (BTS, 2003) para o Reino Unido, produzido em parceria com a indústria de construção, publicado, no início do século XXI, conjuntamente pela *Association of British Insurers* e a *British Tunnelling Society*. Inicialmente, este código foi concebido apenas para o mercado britânico. Contudo, evoluiu rapidamente e, em Janeiro de 2006, foi publicada uma versão internacional, ligeiramente modificada pela *International Tunnelling Insurance Group* (ITIG) e apoiada tanto pela *International Tunnelling Association* (ITA), como pela *International Association of Engineering Insurers* (ITIG, 2006). O objectivo primordial destes códigos passa por promover e assegurar as melhores práticas para a minimização e gestão dos riscos associados à concepção e construção de túneis. Embora sujeitos a críticas, eles são cada vez mais amplamente seguidos e recomendam um modelo útil, através do qual se podem gerir riscos em túneis. Esta gestão tornou-se uma parte integrante da maioria das obras de construção subterrânea.

Também a ITA, depois de muitas discussões em fóruns internacionais, sugeriu o estabelecimento de directrizes internacionais sobre gestão de risco em túneis. Os trabalhos começaram em 1999 na reunião do seu Grupo 2 de Trabalho, em Oslo, e foram concluídos em 2003 (Eskesen *et al.*, 2004). Neles considerou-se que os processos actuais de gestão de riscos poderiam ser significativamente melhorados pela aplicação de técnicas sistemáticas de gestão ao longo do desenvolvimento das obras de um túnel. Através da utilização destas técnicas, potenciais problemas poderiam ser inequivocamente identificados, de modo a que fossem implementadas medidas adequadas de redução do risco em tempo útil.

Têm sido efectuadas algumas pesquisas sobre os benefícios da gestão do risco na indústria da construção. De acordo com um estudo realizado nos Estados Unidos da América, pelo Instituto da Indústria de Construção da Universidade do Texas, pode ser esperada uma relação de custo/benefício de 1/10, como resultado de melhores práticas contratuais, devido à melhoria na atribuição do risco (Smith, 1996 *in* Staveren, 2006). Segundo a mesma fonte, através do estudo de dois importantes projectos de túneis, foi possível, concluir que as aplicações de práticas de gestão de risco levaram a uma redução de custos estimada entre 4 e 22%.

É nas obras mais recentes de grandes túneis como os de *Koralm* (Áustria), *Gotthard* (Suíça), *Nicoll Highway MRT Station* (Singapura), que têm vindo a ser adoptados processos de gestão de risco.

Em Singapura (2004), um acidente durante a construção de um dos túneis de acesso à estação *Nicoll Highway MRT Station*, levou ao abandono do alinhamento original e consequente realinhamento do túnel. Para tal foi implementada uma abordagem de gestão de risco, através da qual foi identificado um número considerável de riscos e adoptada uma panóplia de soluções de Engenharia, quer para os eliminar, quer para os mitigar (Osborne & Lim, 2007).

No Túnel de *Koralm*, na Áustria, ainda em construção, estas metodologias têm contribuído para otimizar a selecção do alinhamento, a estimativa de custos e ainda para a definição de trabalhos de prospecção (Harer, 2009).

Outro exemplo bastante conhecido da aplicação destes processos é o túnel de base de *Gotthard* na Suíça, com final de construção previsto para 2015, e que serviu, entre outras medidas, para a selecção do método de escavação mais apropriado, bem como do modo de

atravessamento. Com os seus 57 km de extensão e chegando a atingir um recobrimento da ordem de 2500 m, essa selecção só pôde ser feita com base numa avaliação cuidadosa dos riscos e das oportunidades (Ehrbar, 2008).

### **2.2.2 Nacional**

Em Portugal, ao contrário de outros países mais industrializados, como os Estados Unidos da América, o Canadá, a Austrália, Suíça e o Reino Unido, entre outros, não existe uma prática consistente para a realização de análises de riscos em Geotecnia. Mesmo assim, importa destacar que se começou a dar os primeiros passos na incorporação destas análises em algumas obras, como é o caso das novas barragens em construção no Norte do país.

No início do século XXI, a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB) decidiu criar um grupo de trabalho com o objectivo de proceder à apropriação e ao desenvolvimento dos conhecimentos sobre a análise de riscos em geral e, em particular, no domínio da segurança das barragens e dos vales a jusante (CNPGB, 2005). Neste caso, a análise de riscos é entendida como a utilização da informação disponível para estimar os riscos para pessoas, bens e ambiente, decorrentes da existência de uma ou de um conjunto de barragens, o que pressupõe a identificação dos riscos, o estudo dos modos através dos quais se podem materializar, e a estimativa das probabilidades dessa materialização e da gama de consequências associadas a cada um dos riscos identificados.

Caldeira (2005) contribuiu para o desenvolvimento e a divulgação dos conhecimentos nesta área, enunciando as vantagens e as limitações deste tipo de abordagem e as suas condições de aplicabilidade à Geotecnia, em geral, e às barragens de aterro, em particular. Foram avaliadas as metodologias de análise de riscos mais utilizadas, tais como o recurso a índices ou a matrizes de risco, as análises dos modos de falha e dos seus efeitos (FMEA), as análises dos modos de falha, efeitos e severidade (FMECA), as árvores de eventos (ETA) e as árvores de falhas (FTA). Santos (2006), na sua dissertação de mestrado, fez um enquadramento geral das análises de risco em Geotecnia com uma aplicação prática à barragem de aterro de Cerro do Lobo.

O esperado desenvolvimento de linhas ferroviárias de alta velocidade (LFAV) em Portugal e o projecto de investigação *Risk Assessment and Management for High-Speed Rail Systems*

(RISK) do programa *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) - Portugal, constituíram a motivação para o desenvolvimento de um trabalho de investigação elaborado por Costa (2008), no qual a autora identifica e caracteriza os riscos sísmicos e geotécnicos associados a LFAV em Portugal.

No âmbito dos túneis e a nível nacional, estas análises são praticamente inexistentes. No entanto, algumas empresas já estão a tentar implementar esta política de gestão de risco. Exemplo disso foram as actividades de gestão de riscos durante a construção da Estação do Terreiro do Paço, da Linha Azul, em Lisboa, após a ocorrência de dois incidentes, no ano 2000, caracterizados pelo afluxo súbito de água e solo à área de escavação (LNEC, 2005 - 2008). De acordo com as condições hidrogeológicas e geotécnicas prevalecentes no terreno e das características da solução estrutural adoptada, foi realizada uma análise de risco qualitativa e foi seleccionado um conjunto de medidas de mitigação necessárias para evitar futuros incidentes.

No ano de 2001, no projecto do Metro do Porto (Chiriotti *et al.*, 2004), procedeu-se à activação de um PGR, que compreendeu não apenas a identificação e redução do risco inicial, mas sobretudo a gestão do risco residual, durante a fase de construção da obra, com recurso ao PAT. O PGR mostrou-se eficaz, uma vez que o controlo de riscos foi ainda mais rigoroso por se tratar de túneis urbanos construídos com recurso ao método de escavação mecanizada (*op. cit.*).

Também as abordagens observacionais, já presentes no Eurocódigo 7 (EC7) – Projecto Geotécnico (CEN, 2004) decorrem dos conceitos associados à avaliação de riscos. Este tipo de abordagem constitui uma ferramenta útil para que os Engenheiros desenvolvam uma maior sensibilidade sobre os potenciais problemas, sua probabilidade e suas consequências, e sobre o modo como os acontecimentos adversos podem interagir.

Barbosa (2008), na sua dissertação de mestrado, para além de descrever as metodologias construtivas e os equipamentos mais adequados, na actualidade, para a abertura de túneis em maciços rochosos, analisa ainda esses métodos construtivos, financeiramente, compara-os e procede a uma análise de risco na qual estabelece um conjunto de práticas, regras e responsabilidades para a gestão eficaz do risco na concepção e construção de túneis, identificando também os principais riscos associados a cada método construtivo.



Em 2004, a Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) lançou o projecto de investigação científica, “Risco geotécnico em túneis para comboios de alta velocidade”, sendo as instituições participantes o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Universidade do Minho (UM). Este projecto consistia no desenvolvimento e implementação de novas ferramentas que permitissem o estudo e a análise do risco geotécnico neste tipo de túneis.

No âmbito deste projecto de investigação científica, foram elaboradas algumas teses de doutoramento, como a de Sousa (2010). Esta autora criou uma base de dados, composta por 204 acidentes ocorridos na construção de túneis em todo o mundo, para posteriormente proceder à avaliação sistemática dos riscos associados com a respectiva construção. Desenvolveu uma metodologia de avaliação de riscos através da combinação de um modelo de previsão geológica (previsão da geologia antes do início da construção do túnel) e um modelo de apoio à decisão que permite aos utilizadores escolher uma estratégia de construção, associado ao menor nível de risco. Contribuiu, desta maneira, para o desenvolvimento da metodologia do sistema *Decision Aids for Tunneling* (DAT) iniciada pelo MIT. Esta análise permite aos Donos de Obra e Projectistas melhorarem os custos, a segurança e a durabilidade da construção subterrânea, pela utilização de conhecimentos avançados e tecnologias inovadoras. A autora aplicou ainda a metodologia a um caso de estudo, os acidentes ocorridos no Metro do Porto nos anos 2000 e 2001. Os resultados foram surpreendentes, uma vez que o modelo previu exactamente uma mudança na geologia em duas zonas onde tinham ocorrido os incidentes. Usando este modelo, Sousa (*in* MIT Portugal, 2010) demonstra que poderia ter sido sugerido um método de construção mais seguro e contribuir, assim, para que aqueles acidentes não tivessem ocorrido.

A abordagem a este tema tem-se intensificado nos últimos anos; foram frequentes os cursos e seminários sobre os processos de gestão de risco em obras subterrâneas em Portugal, em regra sob os auspícios da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Assim, começa-se a tentar acompanhar a evolução dos conhecimentos internacionais e de uma realidade que sempre esteve presente nas obras subterrâneas.

## 2.3 RISCOS GEOTÉCNICOS E SUAS IMPLICAÇÕES

Como anteriormente referido, os riscos geotécnicos em túneis geralmente resultam de condições geotécnicas perigosas que podem afectar negativamente uma obra e, na pior das hipóteses, causar perdas de vidas humanas. Menos trágico, mas também com consequências significativas, a ocorrência de um acidente no interior de um túnel em construção implica: a paragem e consequente atraso no avanço da frente de escavação; eventuais danos em equipamentos; procedimentos para a estabilização da rotura/colapso; reconstrução do trecho obstruído; eventuais danos à superfície, em edifícios existentes na envolvente de túneis em meio urbano; custos adicionais, que nalguns casos chegam a centenas de milhões de euros; inadequação do projecto às condições geotécnicas; afectação da qualidade, saúde, ambiente, segurança; geração de disputas contratuais; etc. (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** As mais prováveis consequências dos riscos geotécnicos em túneis (Highways Agency *et al.*, 2002, adaptado).

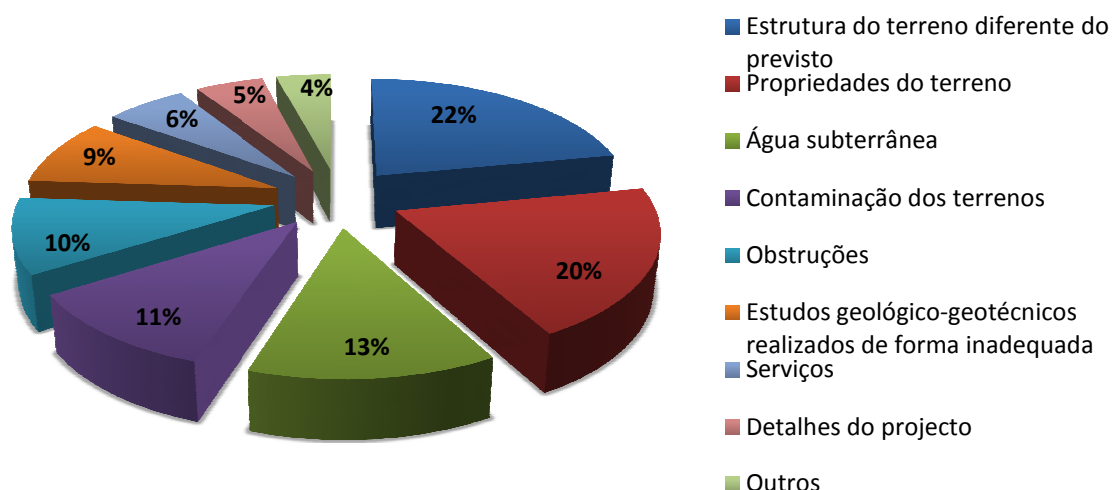
De acordo com Caldeira (2005), os riscos geotécnicos têm três componentes: a técnica, a contratual e a de gestão do projecto. Os riscos técnicos surgem de problemas particulares do local, devido ao facto de a natureza, o tipo e a diversidade de condições do subsolo não serem conhecidas, com exactidão, antes do início da escavação, das actividades de construção com ela relacionadas ou da detecção de anomalias após a entrada ao serviço da estrutura. Os riscos contratuais são determinados pelo tipo de contrato adoptado, onde estão envolvidas questões como a partilha de risco para as condições do terreno, a sua atribuição e assunção por parte dos intervenientes na obra, Dono de Obra e Empreiteiro.

Finalmente, os riscos de gestão do projecto são função da forma como o projecto é coordenado e financiado.

A maior parte dos riscos geotécnicos podem ser controlados com soluções de projecto adequadas, prevenindo a ocorrência do evento de risco (*e.g.*, através da alteração do alinhamento do túnel para evitar a intersecção de uma zona de falha), ou minimizando as consequências do evento de risco (*e.g.*, através do controlo adequado das deformações ou da implementação de um sistema apropriado de drenagem para um elevado afluxo de água). No entanto, alguns riscos geotécnicos não podem ser controlados por soluções económicas e/ou técnicas. Daí que as consequências de um evento de risco, devam ser avaliadas e consideradas no plano de gestão de risco do projecto.

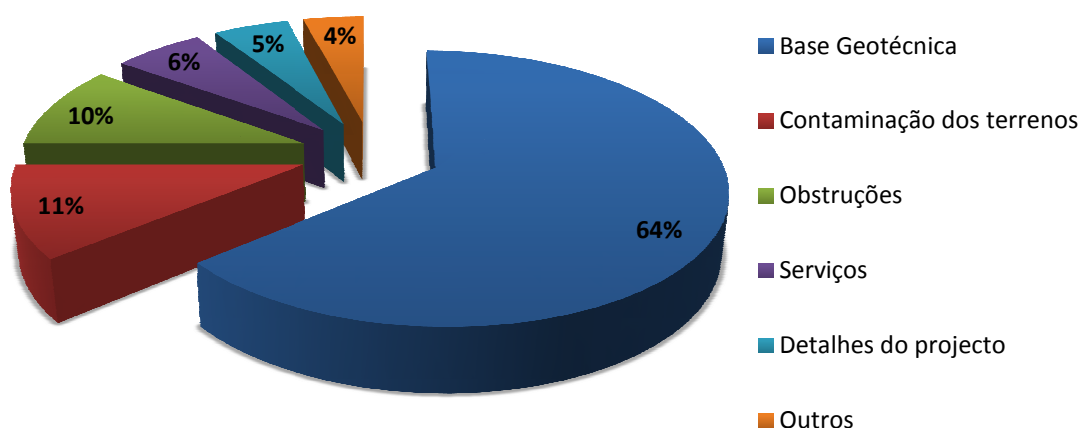
No caso de túneis em maciços rochosos, a maior parte dos riscos geotécnicos está directamente relacionada com as propriedades do maciço e com a influência de factores circunstanciais como as tensões *in situ*, a cinemática, a presença de água subterrânea, a orientação e as dimensões da escavação, entre outros. A interacção das propriedades do maciço rochoso e outros factores influentes definem, eventualmente, o comportamento do maciço rochoso que seria observado durante a escavação sem aplicação do sustimento/medidas de melhoramento. Contudo, esta situação não reflecte as condições típicas durante os trabalhos de construção, a descrição do comportamento do maciço rochoso sem o suporte é necessária para a compreensão básica dos potenciais modos de rotura e eventos de risco (Pöschl & Kleberger, 2004).

Outro aspecto a realçar, é o facto de alguns autores considerarem que o risco geotécnico é condicionado fundamentalmente pela quantidade e qualidade da prospecção, *i.e.*, quanto menor o seu volume para um determinado projecto, maior o risco de se encontrar situações geológicas não previstas. Em termos económicos, a insuficiente qualidade e aprofundamento do projecto, levam rapidamente a um aumento dos custos totais da obra de 5% até 30-50%, em casos que não são raros (Tyrrell, 1983; Mott MacDonald, 1994 *in* Longo & Gama, 2004). O maciço pode criar problemas na construção de obras sob várias formas; a Figura 2.2 mostra os resultados de uma pesquisa sobre os diferentes tipos de problemas geotécnicos encontrados durante a construção de vários tipos de obras onde se incluem os túneis.



**Figura 2.2. Problemas relacionados com o terreno encontrados na construção de obras (Clayton, 2001 in Henderson & Pickles, 2007, adaptado).**

Numa primeira análise, estes problemas parecem ser bastante diversificados. Contudo, supõe-se que aqueles relacionados com a estrutura do terreno, suas propriedades, águas subterrâneas e estudos geológico-geotécnicos realizados de forma inadequada possam ser vistos como questões de base geotécnica. Ao agrupar, a distribuição de fontes de problemas desta índole, torna-se mais significativa, como mostra a Figura 2.3. Nesta, os problemas de base geotécnica referidos, constituem 64% do total dos inventariados. Isto mostra que, cerca de dois terços das fontes de problemas relacionados com o solo e subsolo encontrados na construção de obras, conduziram a uma rotura do processo de construção e referem-se fundamentalmente a suposições ou previsões geotécnicas insuficientes/inadequadas.



**Figura 2.3. Revisão da origem dos problemas geotécnicos encontrados na construção de obras (Clayton, 2001 in Henderson & Pickles, 2007, adaptado).**

Mais recentemente Seidenfuß (2006) apresenta estatísticas sobre os diferentes tipos de causas geotécnicas de colapsos em túneis, próximas das acima discriminadas. Além destas,

apresenta também estatísticas referentes aos tipos de colapso que se produzem e aos que derivam dos métodos construtivos adoptados. Conclui que 40% das roturas são até à superfície, outras 40% delas são localizadas no maciço circundante, 13% são devidas ao afluxo de água, 2% induzidas por explosões e 5% de outro tipo de origem. Por fim, quanto aos métodos construtivos, os métodos convencionais respondem por 55% das roturas, os mecanizados (tuneladoras) por 27% e métodos não identificados no estudo pelos restantes 18%. Os tipos de colapso com roturas até a superfície são predominantes quando se utilizam métodos convencionais. Ao invés, as tuneladoras produzem, normalmente, roturas de dimensões controladas, localizadas na envolvente da frente.

Estas percentagens reflectem o valor que a identificação atempada dos riscos geotécnicos e a escolha do método construtivo podem ter na prevenção de acidentes em túneis e das suas consequências. Ao mesmo tempo, são indicadores da importância que a prospecção geotécnica do maciço tem na gestão do risco geotécnico, contribuindo para a detecção precoce de tais problemas e na implementação de medidas para o seu controlo e correcção. Nos dias de hoje, falar em risco geotécnico é falar em sistemas de controlo de obras num ambiente de parâmetros difíceis de identificar, de caracterizar e de dominar, com enorme heterogeneidade. Fica assim claro que este controlo não é apenas construtivo, ou seja, técnico e de segurança, mas também é financeiro (Matos & Pinto, 2004).

## 2.4 ALGUNS CASOS HISTÓRICOS

O processo de gestão do risco tornou-se comum em túneis, especialmente depois de uma série de colapsos fatais que ocorreram essencialmente na década de noventa, já mencionados. Tais colapsos foram causados, geralmente, por combinação de factores que podem ser divididos em três grupos principais: condições geológicas desfavoráveis, erros ou omissões na concepção e planeamento e erros ou omissões na execução.

Os exemplos seguintes (Metro de Munique, de Taegu e de São Paulo) têm o objectivo de realçar a importância que uma gestão adequada dos riscos geotécnicos presentes em obras deste tipo teria no controlo, minimização ou mesmo eliminação destes desastres.

### a) Metro de Munique, Alemanha, 1994.

Pouco depois de se iniciar os trabalhos de escavação deste túnel, com 7 metros de diâmetro, segundo o *New Austrian Tunneling Method* (NATM) - Novo método austríaco de construção

de túneis, atravessando terrenos essencialmente argilosos/margosos e cascalheiras e sustimento com recurso a betão projectado (GEO, 2009), começaram a aparecer fendas numa das frentes de avanço. Os trabalhadores não conseguiram controlar os grandes afluxos de água e de material e, por conseguinte, procedeu-se à evacuação imediata do túnel. Há superfície, perto de um cruzamento, formou-se uma enorme cratera devido ao colapso do túnel, que rapidamente ficou preenchida com água subterrânea. Um autocarro que se encontrava parado no cruzamento não conseguiu fugir à subsidência e foi parcialmente “engolido” pela cratera (Figura 2.4). Três passageiros morreram afogados e outros trinta ficaram feridos (Munich Re Group, 2004).

Para evitar danos no ambiente, a cratera foi preenchida com betão. Quanto ao saneamento do local, foi escavado um poço circular construído com uma cortina de estacas moldadas. A escavação revelou que a espessura da camada de margas que separava as duas camadas de cascalho condutoras de água era muito menor do que o inicialmente previsto durante a fase de projecto. Além disso, fissuras preenchidas com areia permitiram que a camada de margas deixasse passar a água, o que levou à catástrofe (*op. cit.*).



**Figura 2.4. Autocarro dentro da cratera formada na sequência do colapso de um túnel do metro de Munique (Munich Re Group, 2004).**

b) Metro de Taegu, Coreia do Sul, 2000.

Durante a construção de uma linha de metro em Taegu, Coreia do Sul, a 22 de Janeiro de 2000, mais propriamente na escavação, segundo o método *Cut and Cover*, da futura estação do metropolitano, deu-se um acidente com graves consequências (Munich Re Group, 2004).

Mais uma vez caíram na cratera vários veículos que circulavam naquela altura, três pessoas morreram e houve um ferido grave e, para além disso, produziram-se danos consideráveis nos edifícios vizinhos (Figura 2.5). A causa apontada para o colapso foi determinada como sendo devido a um acréscimo na tensão efectiva que não havia sido tomado em consideração durante o projecto e que resultou de condições imprevisíveis na escavação da obra (*i.e.*, a existência de um nível freático com fortes oscilações colocou em movimento camadas de cascalho e areia que não tinham sido detectadas previamente). Ora esta situação levou a que a resistência para que tinha sido projectada a parede moldada do poço fosse atingida. Como medidas correctivas, a zona de escavação foi coberta por completo, injectou-se argamassa de cimento ao longo de uma extensa zona do subsolo adjacente e as paredes diafragma foram reforçadas (*op. cit.*).



Figura 2.5. Subsidência provocada pelo desabamento de um túnel do metro de Taegu (Wagner & Knights, 2006).

c) Metro de São Paulo, Brasil, 2007.

Durante as obras de construção da estação Pinheiros, no dia 12 de Janeiro de 2007, foi registado o mais grave acidente da história do Metro de São Paulo. Uma grande parte do túnel de acesso à estação desmoronou, abrindo uma cratera com mais de 80 metros de diâmetro. Sete pessoas morreram no acidente. Várias casas sofreram graves danos e diversas viaturas caíram para dentro da cratera (Figura 2.6). As obras ficaram paralisadas até Maio de 2008. Neste trecho o método de escavação utilizado foi o NATM, o diâmetro do corpo da estação era de 18,5 metros, escavados ao longo de 45 m de comprimento, com um



recobrimento médio de 30 metros (GEO, 2009), atravessando terrenos essencialmente argilosos, arenosos e rochas metabásicas alteradas. O colapso verificou-se devido à conjugação de vários factores que conferiram localmente ao maciço um comportamento geomecânico singular. Entre os condicionantes mencionados de destacar: o mergulho oposto das foliações subverticais e paralelas ao eixo do túnel, na iminência de isolar um bloco crítico de grandes dimensões, limitado pelas juntas transversais ao túnel; a existência de um corpo mais rígido de pegmatito, cujo contacto com o maciço envolvente é constituído por uma extensa camada friável de biotite (material que em contacto com a água, se torna extremamente escorregadio, funcionando como lubrificante) de espessura decimétrica e a presença de rochas metabásicas com alteração argilosa, comportamento muito expansivo e com evidências de grande queda de resistência após ultrapassar a resistência de pico (Maffei *et al.*, 2008). Esta é a visão do Empreiteiro, o Consórcio Via Amarela.



**Figura 2.6. Aspecto geral da estação Pinheiros do metro de São Paulo após o acidente (Globo, 2007).**

Mais tarde, o jornal paulista, o Estado de São Paulo (2008) cita que a Companhia do Metropolitano de São Paulo não considerou recomendações técnicas que dariam mais segurança às escavações da obra. Devido a problemas no solo da região, dois relatórios obtidos pelo mesmo jornal indicavam a necessidade da construção ser efectuada a uma profundidade maior que a realizada. Todavia, isso atrasaria a inauguração em seis meses e envolveria novos gastos, não só durante a obra como também após a abertura da estação. A estação foi escavada a 30 metros de profundidade, quando, segundo especialistas, a profundidade ideal do ponto de vista da construção dos túneis e das estações deveria ter sido de cerca de 35 a 45 metros. De facto, isto não removeria a possibilidade de encontrar



argilas, mas teria reduzido bastante a frequência de tal ocorrência. Esta é a posição descrita no relatório produzido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) que aponta ainda para além de falhas executivas, as decorrentes de erros de interpretação das leituras de instrumentação, e deficiências nos planos de emergência (Revista Técnica, 2008). As medidas correctivas basearam-se na estabilização e reforço da secção afectada através de um sistema de ancoragens e melhoramento das características do maciço com recurso a enfilagens.

d) Portugal, 1994-2001.

Também em Portugal, ao longo da história, têm ocorrido acidentes em túneis. Seidenfuß (2006) apresentou estatísticas sobre 110 acidentes em túneis no mundo (dados sobre a data, nome do empreendimento, localização, método construtivo utilizado, condições do maciço, tipo de colapso, causas e consequências), ocorridos nos últimos 70 anos, tendo quatro deles ocorrido em Portugal (Quadro 2.2).

**Quadro 2.2. Acidentes durante a construção de túneis em Portugal (Seidenfuß, 2006, adaptado).**

Data	Localização	Projecto	Condição do Terreno	Método de escavação	Categoria do Colapso
Julho, 1994	Montemor (CREL)	Túnel Rodoviário de Montemor, Caso 1	Calcários e margas	Explosivos	Colapso até à superfície
Agosto, 1994		Túnel Rodoviário de Montemor, Caso 2			
Junho, 2000	Lisboa	Metro de Lisboa, Linha Azul, Pontinha-Amadora Este	Areia	TBM (Tunneling Boring Machine)	Entrada súbita de água, cavitação do tecto
Outubro-Janeiro, 2000-2001	Porto	Metro do Porto	Rochas ígneas (duas micas, granito grão grosseiro), material aluvionar sobre o granito alterado (rocha sã a solo residual); nível freático 10-25m acima do túnel	TBM com escudo e ar comprimido (EPBS)	Cavitação do tecto

Todos os casos apresentados anteriormente, são exemplos de uma gestão de riscos em obras subterrâneas, inexistente ou insuficiente, e que não são aceitáveis perante a actual conjuntura de desenvolvimento técnico. Nos últimos anos, os riscos nas obras subterrâneas aumentaram, parcialmente devido ao aumento no número de obras em curso. Este cenário demonstra a necessidade urgente de promover procedimentos pró-activos de gestão de riscos, para evitar os danos causados por acidentes de grande porte, onde o montante dos prejuízos ocorridos muitas vezes inviabiliza a obra.

## 2.5 ETAPAS DE GESTÃO DE RISCO E FASES DE OBRA

Para melhorar o controlo da complexidade de estruturas como os túneis, foram introduzidas novas orientações, que visam proporcionar uma base melhor para o respectivo planeamento dos estudos, da construção e do tempo/estimativa de custos. Para cumprir o objectivo principal de limitar os efeitos dos riscos existentes e futuros e propor soluções que contribuam para reduzir as consequências dos eventuais efeitos, foi-se adaptando as etapas de gestão do risco às fases da obra de um túnel.

Schubert (2004) distingue quatro fases de obra e aplica uma gestão do risco designando para cada fase determinadas tarefas (Figura 2.7). Observa-se que são nas fases preliminares de projecto, que é possível obter uma maior redução no nível de risco da obra subterrânea. Na fase de construção o risco deve-se situar abaixo do nível de risco aceitável, por fim, na fase de exploração este risco deve ser ainda menor, lembrando que os riscos operacionais frequentemente são diferentes dos riscos construtivos.

De acordo com a Figura 2.7 e segundo o mesmo autor, para as diferentes fases deve-se empreender as seguintes actividades:

### Fase 1: Estudo prévio

- ✓ Identificar os factores gerais de risco geotécnico;
- ✓ Efectuar uma primeira classificação do risco, estabelecer prioridades;
- ✓ Optimizar o alinhamento e/ou a localização do túnel;
- ✓ Avaliar e seleccionar os métodos básicos de construção.

### Fase 2: Anteprojecto

- ✓ Melhorar a avaliação do risco e dos métodos de construção seleccionados;
- ✓ Avaliar probabilidades de ocorrência e potenciais danos;
- ✓ Minimizar o risco através de adaptações no projecto ou medidas adicionais;
- ✓ Definir o risco residual e o comportamento esperado na construção;
- ✓ Definir os critérios para o MO.

### Fase 3: Processo de Concurso

- ✓ Definir a responsabilidade do risco;
- ✓ Definir métodos comercialmente justos para lidar com as incertezas;
- ✓ Incluir, opcionalmente, o Empreiteiro na avaliação de riscos.

## Fase 4: Construção

- ✓ Desenvolver um PGR;
- ✓ Especificar e organizar o MO.

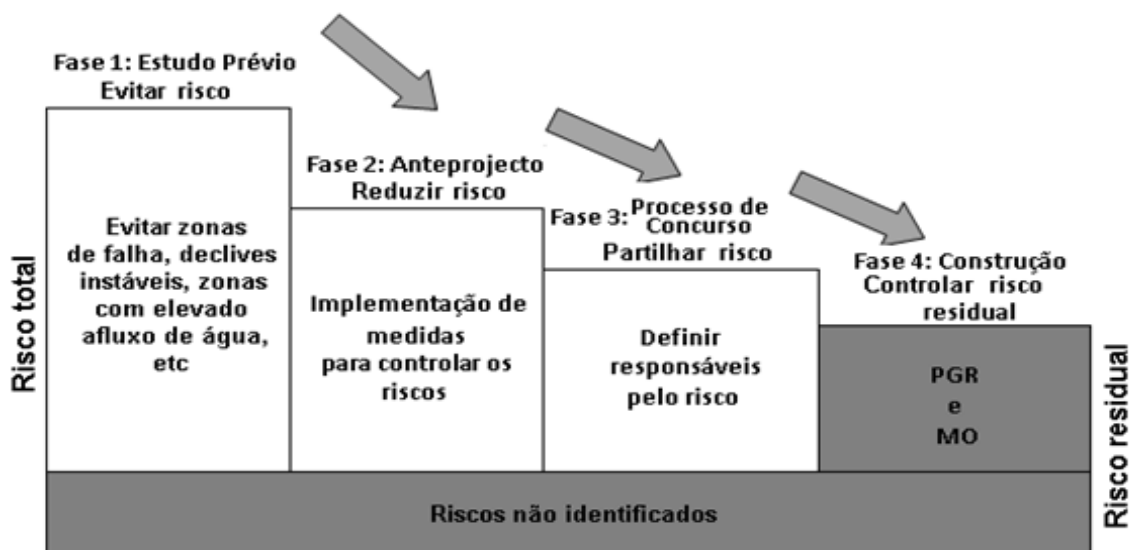


Figura 2.7. Gestão e redução do risco durante as diferentes fases da obra (Schubert, 2004, adaptado).

Tomando uma posição um pouco diferente da de Schubert (2004), Caldeira (2005) propõe uma metodologia de gestão cujas etapas estão resumidas da seguinte forma:

- ✓ A recolha dos dados publicados e não publicados relativos às condições locais do terreno;
- ✓ A identificação dos perigos e dos riscos geotécnicos para as diferentes fases da obra, com base na informação e na experiência existentes;
- ✓ A classificação dos riscos geotécnicos de acordo com a sua probabilidade de ocorrência e com o seu impacto na construção;
- ✓ A identificação de medidas para evitar, gerir, minimizar, partilhar ou transferir o risco, e a verificação de que o nível residual do risco é aceitável;
- ✓ A atribuição de responsabilidades pelo controlo de cada risco identificado e pelo respectivo encargo económico.

As etapas anteriormente descritas estão em consonância com a estrutura de gestão do risco que tem sido desenvolvida nos Países Baixos por Staveren (2006) desde o início do presente século, resultado de diversos anos de experiência profissional e aplicação de técnicas comprovadas de gestão de risco. Este método, designado de GeoQ (Figura 2.8), onde Q significa qualidade, define-se como um processo cíclico de gestão de riscos do terreno relacionados com as actividades de construção (*op. cit.*). É um método inovador, apesar de

os seus elementos serem bastante conhecidos, e consiste num aprofundamento dos processos já existentes de gestão de riscos. Distingue 6 etapas na gestão, constantemente aplicadas e actualizadas, ao longo das 6 fases que complementam a obra; daí ser um método bastante dinâmico e flexível.

Embora as seis fases de obra GeoQ sejam flexíveis, as seis etapas de gestão de riscos GeoQ são bastante rígidas. Estas etapas genéricas devem ser aplicadas, uma a uma, de forma estruturada e estritamente executadas em cada fase de obra, independentemente do número de fases que esta envolva, a fim de se implementar uma adequada gestão dos riscos relacionados com o terreno (Staveren, 2006).

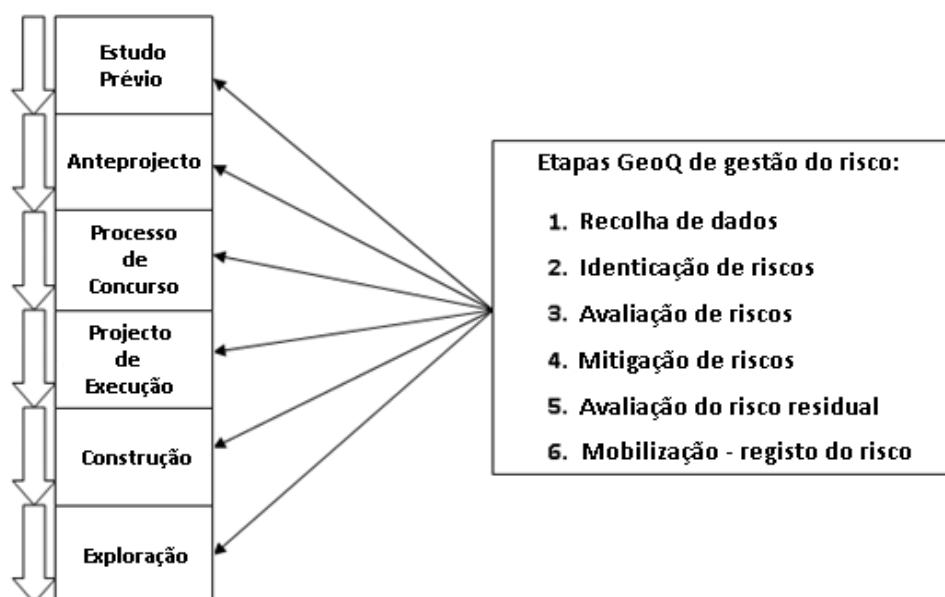


Figura 2.8. Modelo GeoQ de gestão do risco (Brinkman, 2008, adaptado).

Face ao âmbito do trabalho e como já referido, serão tratados com maior ênfase os aspectos associados aos processos de gestão de riscos, principalmente os ligados à fase de construção. Para tal, a presente dissertação pretende implementar uma metodologia intermédia entre o proposto acima por Schubert (2004) e o processo GeoQ (Staveren, 2006), defendendo que todas as 6 etapas desse processo deverão ser aplicadas durante a fase de construção; no entanto, para isso, terá de ser dada maior importância a umas do que a outras. Para isso nos capítulos que se seguem é abordado todo o processo (identificação, avaliação, mitigação e, observação e controlo) que deve ser desenvolvido para se chegar à fase de construção com um risco residual aceitável. Deste modo, é importante distinguir de forma clara os procedimentos de gestão do risco, fase de projecto *versus* fase de construção (Figura 2.9).

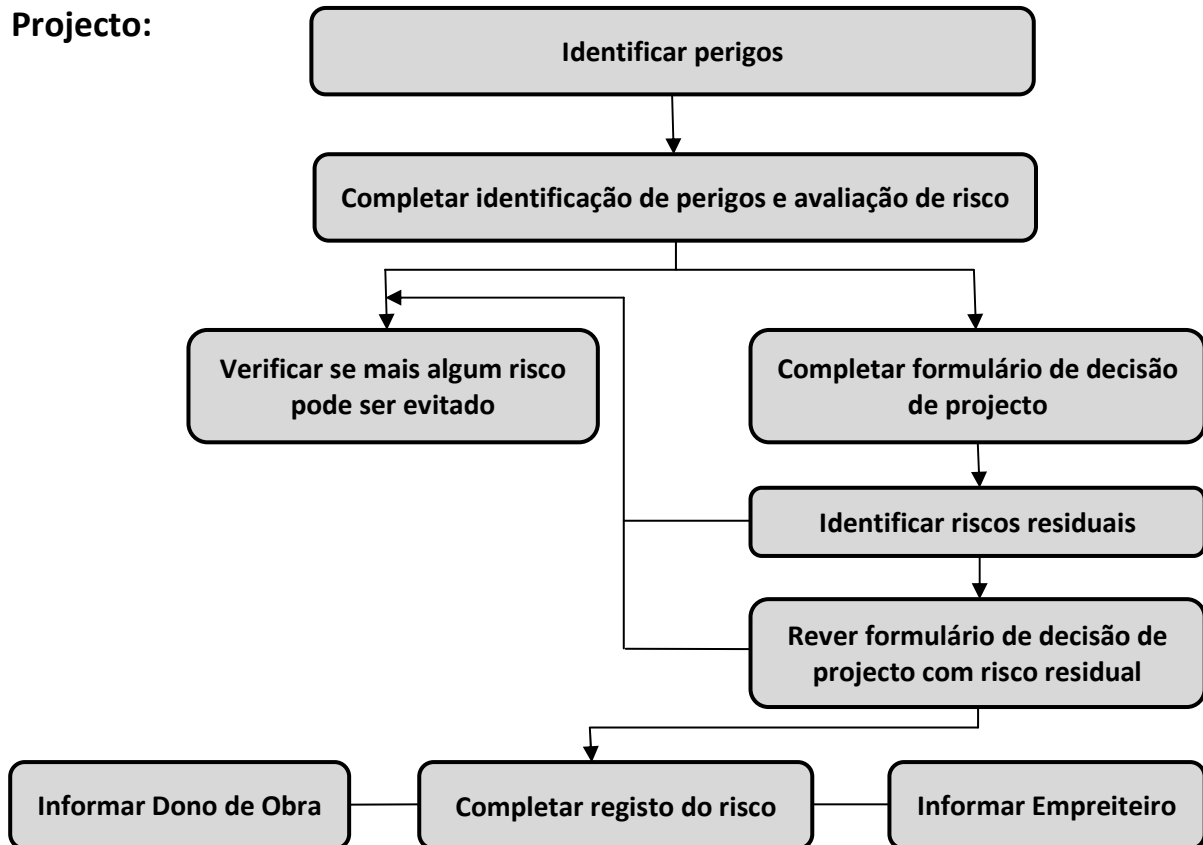
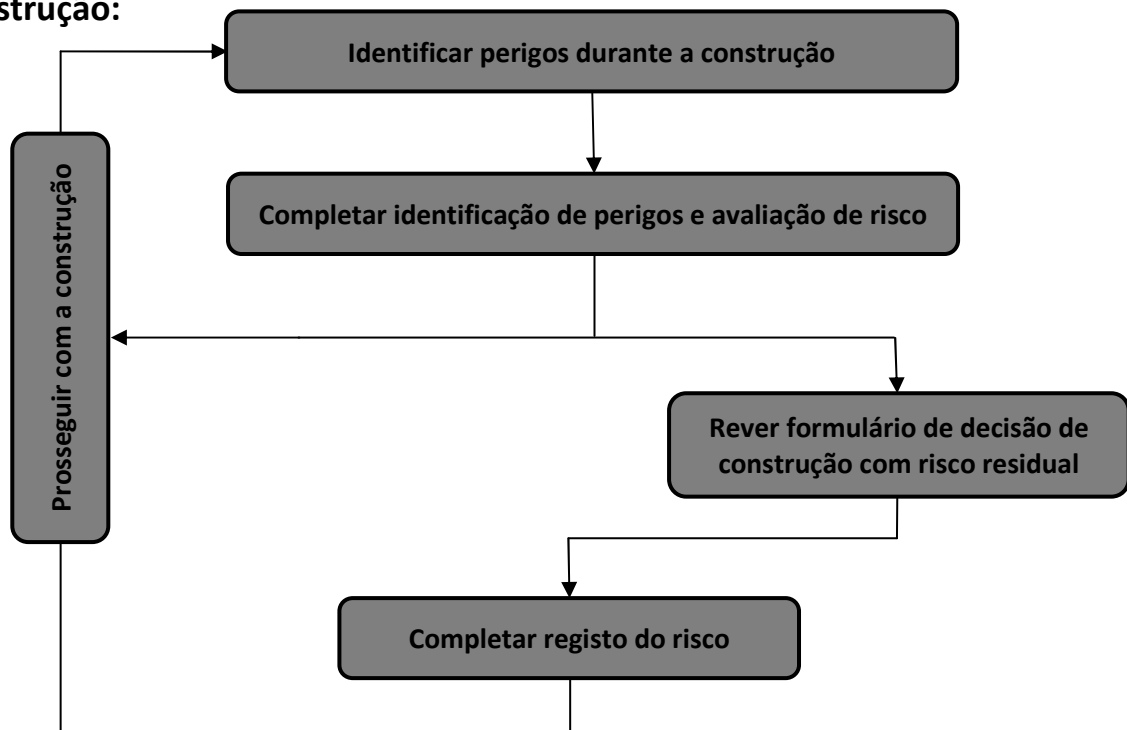
**Projecto:****Construção:**

Figura 2.9. Fluxograma de risco fase de projecto *versus* fase de construção (Wagner, 2006, adaptado).

Seguidamente será apresentado um caso de obra em que as metodologias atrás apresentadas foram de facto implementadas e cuja eficácia foi demonstrada.

### **Caso de sucesso: Túnel de *San Diego State University (SDSU)*, *Califórnia*, 2002.**

Um bom exemplo da aplicação dos procedimentos pró-activos de gestão de riscos, realizada com sucesso, é o caso da construção do túnel SDSU.

Revestido a betão projectado, este é um pequeno túnel com 330 metros de comprimento, que passa sob o *campus* da Universidade do Estado de San Diego, composto por uma linha dupla de metro ligeiro (Thomas *et al.*, 2003 in Silverton *et al.*, 2004). O túnel, com 11 metros de vão, encontra-se envolvido por um conglomerado (*i.e.*, um depósito denso de cascalheira numa matriz arenosa). Poucos túneis foram construídos nesta área, daí que o comportamento do conglomerado ainda não estivesse bem definido. Apresenta-se em seguida e de forma sucinta a gestão de riscos efectuada.

#### **✓ Identificação dos riscos**

Uma avaliação inicial dos riscos identificou quatro focos de problemas: a presença de água no conglomerado que poderia levar à perda de resistência por amolecimento do material; a existência de profundas lenticulas de areia solta; o fraco recobrimento dos emboquilhamentos e a potencial actividade sísmica da área. Também fora constatado que o método de construção, utilizando betão projectado, era novo na região. Foram examinadas diferentes sequências de construção em cada uma das secções chave, usando um modelo numérico e com base nos resultados foram especificadas uma série de classes de suporte. Para estudar o comportamento algo complicado do conglomerado, foi utilizado um sofisticado modelo numérico não-linear, validado com base em ensaios de carga em placa realizados *in situ* (Pound *et al.*, 2003 in Silverton *et al.*, 2004).

#### **✓ Medidas de mitigação**

A partir da modelação numérica verificou-se que, subdividindo a semi-secção superior do túnel numa galeria e posteriormente procedendo ao seu alargamento (Figura 2.10), o túnel permanecia estável, mesmo na presença de água. Esta seria drenada de maneira a reduzir as pressões na envolvente do túnel. No projecto estavam incluídas uma série de medidas adicionais de suporte, que poderiam ser aplicadas no caso de se encontrar lenticulas de areia. Nalgumas secções o recobrimento chegou a atingir apenas 7 m acima dos 11m de vão do túnel. Mais uma vez, a subdivisão da frente mostrou-se suficiente para manter a estabilidade. A rápida conclusão de todo revestimento com o fecho da soleira foi importante para minimizar os assentamentos devidos ao terreno ser brando. Contudo, o conglomerado

era suficientemente resistente para ser executado o desmonte da semi-secção superior, ao longo de todo o comprimento do túnel e só depois se proceder à escavação da soleira.

O projecto sísmico foi baseado em modelos numéricos de comportamento dinâmico, confrontados com simples orientações analíticas para a rigidez relativa da estrutura em relação ao terreno.

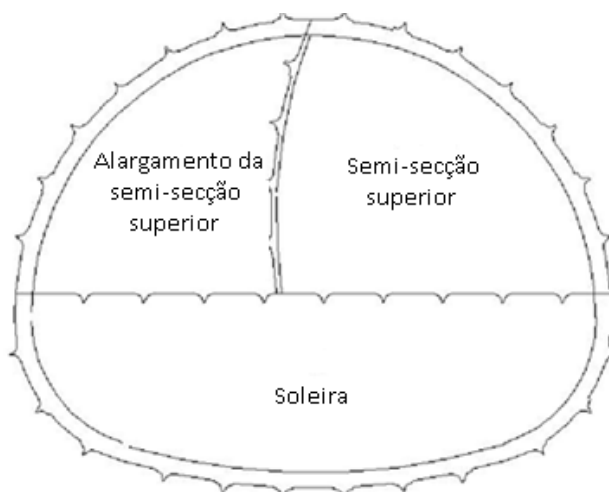


Figura 2.10. Secção transversal adoptada para o túnel SDSU (Silverton *et al.*, 2004, adaptado).

#### ✓ Gestão dos riscos na fase de construção

Um representante da equipa de projectistas esteve presente durante todo o período de construção para auxiliar o Empreiteiro e avaliar as mudanças propostas nas medidas de sustimento. Os resultados da monitorização desenvolvida no túnel e no terreno foram avaliados e revistos, diariamente, em reuniões, onde eram também definidas as medidas de sustimento a adoptar para o dia seguinte. Dentro das classes de suporte especificadas no projecto, o sustimento poderia variar de modo a adaptar-se às condições reais encontradas. Sem dúvida que um benefício adicional foi a presença de um elemento da equipa de Projectistas no local que promoveu, assim, o diálogo entre Projectistas e Empreiteiro. Desta maneira, os problemas foram identificados precocemente e as soluções adoptadas foram desenvolvidas em conjunto.

Em suma, como resultado do trabalho de equipa, o túnel foi concluído com sucesso, em Dezembro de 2002, dentro do prazo previsto. O solo provou ser tão rígido como os ensaios o tinham sugerido, havendo pouca afluência de água. Foram registados assentamentos muito pequenos, de acordo com as previsões iniciais do projecto. A optimização do sustimento e da sequência de escavação possibilitou minimizar custos, bem como atenuar os efeitos de outros atrasos na obra.





### **3 PROCESSOS DE GESTÃO DO RISCO GEOTÉCNICO EM TÚNEIS**

O presente capítulo começa por descrever as principais metodologias usadas na identificação dos riscos geotécnicos em túneis e em detalhe a análise por listas de verificação. É também através destas listas que se apresentam os principais perigos, e riscos geotécnicos relacionados com determinados métodos construtivos.

Posteriormente é feito um resumo geral das técnicas consideradas mais adequadas de análise em túneis, tanto através de técnicas quantitativas (FTA e ETA) como qualitativas (Classificação do risco). Para cada técnica é exemplificada a sua aplicação.

Seguidamente e de forma sumária é descrita a etapa de apreciação do risco, *i.e.*, a verificação se o risco remanescente é aceitável ou não, baseada na matriz de risco ou segundo o princípio ALARP.

Quanto à mitigação do risco são introduzidas e descritas as estratégias mais frequentes, evitar, reduzir, transferir, aceitar e partilhar, são avançados alguns exemplos de implementação de acções de mitigação, é exposto o papel que a prospecção geotécnica tem na determinação e redução do risco durante o projecto e ulteriormente durante a construção, bem como todos os benefícios que dela poderão advir. É abordada a questão da escolha correcta do método construtivo e da técnica de análise (árvore de decisão) que poderá contribuir para que tal selecção seja a mais adequada, destacando a importância que aquele pode ter no sucesso de uma obra, tudo exemplificado através de um caso prático.

#### **3.1 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PERIGOS/RISCOS GEOTÉCNICOS**

##### **3.1.1 Principais metodologias**

A identificação do risco é a segunda etapa do processo cíclico de gestão dos riscos GeoQ (Staveren, 2006). Para a identificação dos perigos decorrentes do terreno e da obra que se pretende executar dever-se-á, em primeiro lugar, proceder a uma pesquisa exaustiva da informação existente sobre o local do futuro empreendimento (localização, zonas envolventes, história, geologia, água subterrânea, etc.), com vista à avaliação das condições mais plausíveis do terreno e da sua gama de variação. Esta deve ser tão exacta e completa quanto possível, pois todos os erros ou omissões cometidos nesta fase serão perpetuados nas fases subsequentes.

De acordo com Baya *et al.* (1997 *in* Staveren, 2006), os benefícios da identificação dos riscos são ainda mais relevantes do que os das etapas seguintes, de avaliação e mitigação. A identificação de riscos consiste no reconhecimento da existência de perigos e a determinação dos riscos a eles associados, na tentativa de definir as suas características. Por outro lado, consiste também no reconhecimento das oportunidades que podem reduzir os custos e/ou a duração da obra. Usualmente é um procedimento deliberado de estudo e revisão de sistemas, identificação do que pode falhar, porquê e como, na tentativa de antecipar todos os seus possíveis perigos e consequentes evoluções adversas.

De uma forma geral, observa-se na bibliografia da especialidade que os autores consideram esta fase como uma das mais importantes em todo processo de gestão de riscos, pois apresenta um impacto maior na exactidão das avaliações, já que a forma como os riscos são identificados e colectados constitui um ponto fulcral na efectividade de todo o processo. O principal desafio continua a ser: identificar um número máximo de riscos previsíveis, tendo ao dispor uma série de ferramentas, como auxílio no processo. A

Figura 3.1 apresenta uma série de métodos e procedimentos mais utilizados na identificação de risco em túneis.

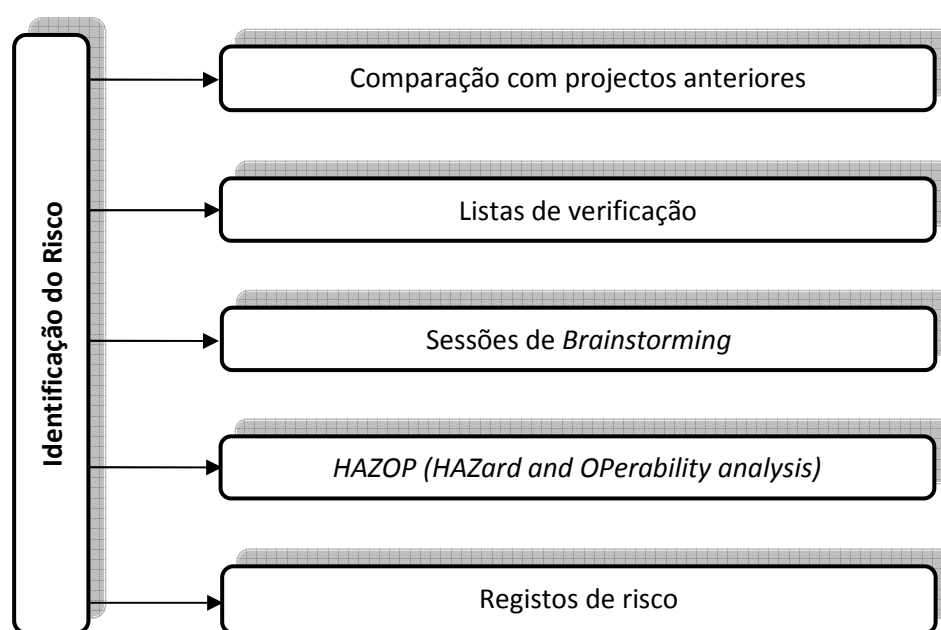


Figura 3.1. Métodos e procedimentos mais utilizados na identificação de riscos em túneis.

O Quadro 3.1 apresenta uma descrição sumária das técnicas de identificação de risco mais usuais em túneis.

Quadro 3.1. Descrição das técnicas de identificação de risco.

Técnica	Descrição
Comparação com projectos anteriores	É um método que identifica os perigos do projecto em causa com base em projectos similares anteriores. Os projectos devem seguir um sentido padrão para que as informações básicas sejam registadas, com o propósito de se transferir conhecimentos de forma eficiente, de projecto para projecto. Os dados devem ser classificados para facilitar a recuperação da informação. Cada projecto de túnel gera uma quantidade considerável de dados, pelo que a elaboração de uma estrutura de divisão hierárquica de risco, representa uma boa opção para atingir este objectivo (Flores, 2006). É uma técnica de utilização simples, mas que só é confiável quando as actividades anteriores a que são comparadas são de facto semelhantes e é essencial que os membros da equipa tenham o conhecimento especializado necessário.
Listas de verificação ( <i>checklists</i> )	São geradas a partir de informações históricas e conhecimentos acumulados de projectos similares anteriores. Trata-se de uma técnica de identificação de riscos que fornece uma listagem das fontes típicas de potenciais acidentes a considerar. É baseada principalmente em revisão de documentos, entrevistas e inspecções de campo. Consiste numa lista de itens, que vão sendo marcados de forma booleana. São executadas por profissionais da área, mas podem ser utilizadas por outras pessoas, não especialistas em análise de riscos. São usadas rotineiramente em todos os níveis e fases. Para além de identificar riscos, podem também ser utilizadas nas etapas seguintes de avaliação e mitigação de risco, já que muitas podem incluir a classificação de risco e informação sobre o respectivo controlo.
Sessões de <i>Brainstorming</i>	Reuniões de grupos de especialistas para identificar os riscos, com base numa combinação das suas percepções e experiências individuais. É uma técnica dividida em duas fases: 1ª fase criativa, onde os participantes apresentam o maior número possível de ideias; 2ª fase crítica, onde cada participante defende a sua ideia com o objectivo de convencer os outros membros. Nesta fase são filtradas as melhores ideias, permanecendo somente as aprovadas. A técnica é composta por quatro regras básicas (Morano <i>et al.</i> , 2006): (1) na fase criativa as críticas devem ser banidas – a avaliação das ideias deve ser guardada para momentos ulteriores; (2) a geração livre de ideias deve ser encorajada; (3) enfoque na quantidade, em detrimento da qualidade – quanto maior o número de ideias, maiores as hipóteses de serem viáveis; (4) Combinação e aperfeiçoamento das ideias geradas. As entidades envolvidas neste processo são geralmente: Dono de Obra, Fiscalização, equipas e consultores de gestão do projecto, Empreiteiro, consultores externos, etc.
HAZOP (Análise dos perigos e da operacionalidade)	Técnica de identificação de perigos que avalia, sistematicamente, cada parte do sistema para verificar como os desvios de determinadas grandezas podem ocorrer e se estes podem causar problemas (Santos, 2006). Usa palavras-chave ( <i>mais, menos, não</i> , etc.), combinadas com condições de processo (velocidade, fluxo, pressão, etc.), para classificar os desvios das grandezas em análise. Essas palavras orientadoras são uma característica única da análise HAZOP. A tarefa da equipa de análise é determinar as causas e as consequências dos desvios e propor acções correctivas. Este método pode ter aplicabilidade privilegiada na fase de construção, pois pode encontrar potenciais riscos nos meios mecanizados (TBM, roçadoras, etc.), envolvidos na respectiva construção. O método centra-se na resposta dos vários subsistemas e tem como principais vantagens o carácter sistemático e uma aplicação relativamente expedita; como principal desvantagem, tem a de não analisar explicitamente os modos de rotura que podem determinar os desvios em causa.
Registo de riscos	É um elemento-chave na gestão de riscos. Segundo Clayton (2001 <i>in</i> Staveren, 2006) é o arquivo onde a informação de risco é armazenada. Estes são documentos “vivos”, continuamente analisados e revistos e convenientemente disponíveis em qualquer momento. Incluem não só os riscos identificados em sessões de <i>brainstorming</i> , mas também os novos, identificados ao longo da obra. As informações mínimas que um RR deve incluir são: o identificador de risco, o seu nome, a avaliação da probabilidade e impacto (qualitativo ou quantitativo), o responsável do risco, medidas de mitigação, de controlo, e a data para a sua revisão. A avaliação do impacto pode ainda ser subdividida em áreas de impacto diferentes como: segurança, custo, tempo, qualidade, desempenho, etc. As informações recolhidas até ao final da obra e a eficácia dos métodos utilizados devem integrar o RR, para a optimização dessas medidas em projectos futuros. O registo é a ferramenta de comunicação mais importante na gestão do risco (Flores, 2006). Será debatido e exemplificado no Capítulo 5.

Para além, das técnicas mencionadas, existem outras cuja aplicabilidade a obras subterrâneas é muito menor e, por essa razão, não foram descritas. Tratam-se de: entrevistas, questionários, consultas de bibliografia, técnica de *Delphi*, análise preliminar de riscos, análise de cenários, entre outras (Flores, 2006; Morano *et al.*, 2006; Santos, 2006).

Para que a identificação de riscos seja consistente é necessário que esta seja conduzida por uma equipa multidisciplinar composta por especialistas nas diversas áreas de interesse para a análise de risco, como Sismólogos, Geólogos, Engenheiros, etc. A qualidade final da gestão dos riscos geotécnicos depende, em muito, da realização de uma correcta identificação de riscos. Se a gestão de riscos é realizada de forma sistemática, mas não consegue identificar nenhum dos principais riscos da obra, esta pode-se tornar num fracasso. A Figura 3.2 mostra as técnicas mais utilizadas, segundo a bibliografia da especialidade, para identificar riscos. Estas foram classificadas segundo percentagens de utilização, proporcionando, assim, uma avaliação relativa entre elas.

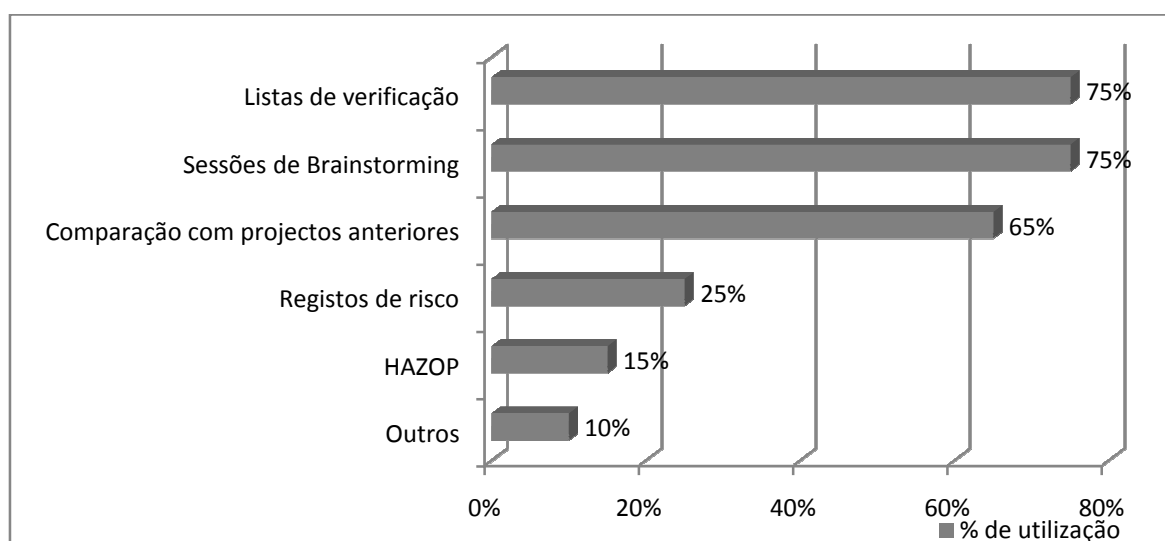


Figura 3.2. Técnicas de identificação de risco mais usadas em túneis (Flores, 2006, adaptado).

Como se pode observar a técnica de *Brainstorming* juntamente com as listas de verificação, são as seleccionadas pela maior parte dos profissionais. Como referido é precisamente sobre esta última que o presente trabalho irá versar.

### 3.1.2 Identificação por listas de verificação

A técnica de listas de verificação (Quadro 3.2), é um método que confirma o risco através de uma lista preparada com antecedência, que inclui os componentes eventualmente perigosos

existentes num determinado processo. É recomendada como a base inicial da análise de riscos.

É uma abordagem indutiva, *i.e.*, inicia-se a partir de casos específicos, observações particulares, progredindo para generalizações mais amplas. Assim, na consideração de um certo sistema, ao postular-se uma rotura em particular ou uma condição inicial e ao averiguar-se o respectivo impacto ou condição no desempenho do sistema, está a efectuar-se uma análise indutiva do sistema, *e.g.*, durante a construção de um túnel pode-se estudar quais as repercussões da instalação de um certo tipo de sustimento em detrimento de outro mais robusto (Santos, 2006). É também uma análise qualitativa, uma vez que actua de uma forma descritiva para caracterizar as várias partes envolvidas nos riscos associados a um sistema, como sejam os modos, os cenários e os mecanismos de rotura e os factores de exposição, bem como as consequências previsíveis.

**Quadro 3.2. Exemplo de uma lista de verificação (United States Coast Guard, 2000a, adaptado).**

Pontos a avaliar	Sim	Não	Não avaliado	Comentários
<b>Área do assunto 1</b> Avaliação do ponto 1.1 Avaliação do ponto 1.2 Avaliação do ponto 1.3 . .	 ✓ ✓	  ✓		Recomendação A
<b>Área do assunto 2</b> Avaliação do ponto 2.1 Avaliação do ponto 2.2 Avaliação do ponto 2.3 . .	 ✓ ✓		✓	
<b>Área do assunto 3</b> . .				

Esta técnica deve ser utilizada a partir das fases preliminares do projecto e sofrer constantes actualizações durante todo o respectivo desenrolar. É uma análise que vai de encontro a um conjunto de especificações e linhas directrizes que são apresentadas sob a forma de uma ou de várias listas de verificação. Quando conduzida de maneira adequada, produzirá resultados satisfatórios tais como: a revisão de um grande número de riscos, o acordo entre as áreas de actuação a fim de propiciar uma operação segura, e ainda a produção de relatórios de fácil compreensão (Almeida, 2005).

As principais características das listas de verificação são:

- ✓ É uma abordagem sistemática construída a partir do conhecimento histórico da obra, ou de outras similares, através da inclusão de tópicos nas listas;
- ✓ Podem ser usadas para uma análise com nível de detalhe elevado;
- ✓ Aplicáveis a qualquer actividade ou sistema, incluindo questões relacionadas com equipamentos e factores humanos;
- ✓ Geralmente realizadas por pessoas com formação para entenderem as questões nelas inseridas. Às vezes, conduzida por um pequeno grupo de indivíduos, não necessariamente especialistas em análise de riscos;
- ✓ Baseadas principalmente em entrevistas, revisão de documentos e em inspecções de terreno;
- ✓ Geram listas qualitativas com determinações conformes, não conformes e recomendações para corrigir as não conformes;
- ✓ A qualidade da avaliação é determinada, em primeiro lugar, pela experiência dos especialistas que as criaram, seguida pela formação dos potenciais utilizadores;
- ✓ Utilizadas para identificar todos os elementos da cadeia de eventos que induzem risco no sistema, também pode ser usada como um complemento ou parte integrante de outro método.

As principais vantagens e desvantagens desta técnica estão listadas no Quadro 3.3:

**Quadro 3.3. Vantagens e desvantagens da utilização de listas de verificação (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000a, adaptados).**

Vantagens	Desvantagens
<b>Altamente eficaz na identificação de diversos riscos.</b>	<b>Probabilidade de ignorar alguns potenciais problemas.</b> A estrutura da análise por listas de verificação baseia-se, exclusivamente, nos tópicos que se encontram listados. Se a lista não aborda uma determinada questão fundamental, é provável que a análise ignore algumas deficiências potencialmente importantes, existentes na obra.
<b>Técnica de identificação de forma rápida e simples.</b>	<b>Tradicionalmente, apenas fornecem uma informação qualitativa.</b> A maioria das listas de verificação só produz resultados qualitativos, sem estimativas quantitativas das características dos riscos identificados. Essas listas só podem responder a questões mais complicadas relacionadas com o risco, se for adicionado algum grau de quantificação, possivelmente com uma classificação relativa / estratégia de indexação de risco.
<b>Pode ser usada por pessoas não especialistas.</b>	<b>Tende a depender fortemente da experiência dos especialistas que as criam.</b>

O procedimento para a realização de uma análise por listas de verificação pode ser dividido em sete etapas principais (Figura 3.3).

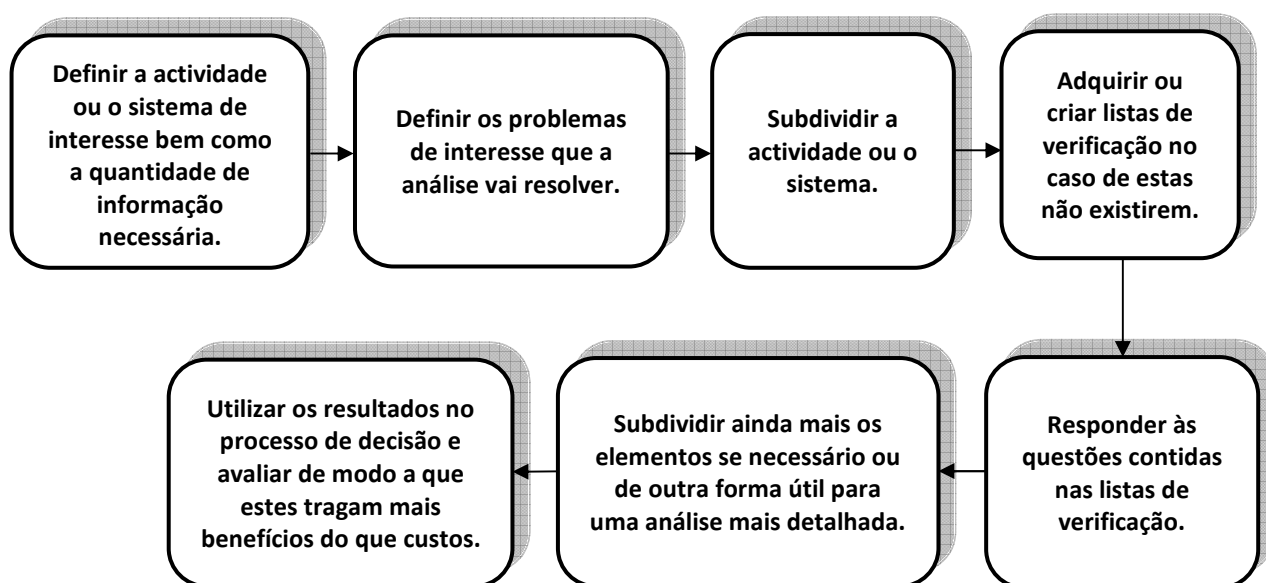


Figura 3.3. Procedimento da análise por listas de verificação (United States Coast Guard, 2000a, adaptado).

Embora as técnicas qualitativas sejam algo subjectivas, sem sombra de dúvida que a importância das mesmas se reafirma a partir do momento em que atitudes simples, como a revisão de riscos, proporcionam a identificação de eventuais falhas nos eventos que podem propiciar um grande risco de não cumprimento do programa das actividades ulteriores.

### 3.1.2.1 Perigos geotécnicos

O Quadro 3.4, que constitui um excerto do Quadro I.A – Anexo I, pretende ser um contributo para a identificação dos potenciais perigos geotécnicos em túneis. É uma lista de verificação que procura descrever, de forma não exaustiva, os principais perigos geotécnicos (*i.e.*, geológicos e geotécnicos), que poderão ocorrer aquando da construção de um túnel, sejam quais forem as condições em que este se encontra, e que mais facilmente poderão levar ao colapso em obra. É claro que a ocorrência de muitos destes perigos depende do tipo e características do maciço potencialmente atravessado (*i.e.*, da litologia e estrutura da área atravessada pelo túnel, condições hidrogeológicas, geomecânicas, etc.). A detecção do perigo avançada compreende certos indícios, ensaios e estudos, que poderão ser observados, realizados e adaptados, às fases de projecto e de construção. Os perigos são assinalados na coluna “Sim” se ocorrerem e na “Não” caso contrário.

**Quadro 3.4. Principais perigos geotécnicos (excerto do Anexo I - Quadro I.A.).**

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs. ( <sup>5</sup> )
<b>Condições mistas devido a variações estruturais / litológicas e/ou geomecânicas na frente de escavação</b>	Zonas de transição entre terreno rijo/brando e brando/rijo; situação em que parte da frente é em rocha e a restante é em solo; alternância entre rocha sã e rocha meteorizada; solos granulares não coesivos e coesivos; blocos de rocha rija numa matriz mais branda (inclusões); uma vez exposta, a face do túnel pode apresentar comportamentos diferentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prospeção geofísica (resistividade eléctrica e sísmica de refração);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (sondagens carotadas).</li> </ul>			
<b>Abrasividade/dureza da rocha</b>	O quartzo está entre os minerais mais abrasivos; das rochas que contém grande quantidade de quartzo na sua composição podem-se destacar o granito, o quartzito, o arenito, etc.; estas oferecem grande resistência ao corte e provocam desgaste elevado nos bits das ferramentas de perfuração para desmonte com explosivos e nos discos de corte das tuneladoras utilizadas na escavação de túneis em rocha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Recolha de amostras de sondagens ao longo do alinhamento para ensaios de resistência à compressão uniaxial, tracção e dureza Cerchar e abrasividade;</li> <li>✓ Avaliação do desgaste nos discos de corte das TBM e nos bits das ferramentas de perfuração dos furos para desmonte com explosivos;</li> <li>✓ Determinação da percentagem de quartzo equivalente em amostras recolhidas.</li> </ul>			

<sup>5</sup> Observações.

### 3.1.2.2 Riscos geotécnicos relativos ao método construtivo

Com o desenvolvimento de novos túneis, mesmo em terrenos com condições desfavoráveis, os riscos relacionados com os diferentes métodos de construção, tornaram-se ainda mais importantes. Por outro lado, o desempenho do método de construção em tais condições será muito menor do que a taxa prevista se a máquina seleccionada não for a mais adequada. Para isso é importante descrever quais os riscos geotécnicos mais prováveis de ocorrer, ligados a determinado método construtivo.

O Quadro 3.5, que constitui um excerto do Quadro I.B – Anexo I, avança com um contributo para a identificação dos principais riscos geotécnicos relacionados com o método construtivo, *i.e.*, com o método/técnica de escavação. A lista de verificação, proposta não pretende ser exaustiva, servindo apenas como uma base inicial. Existem vários riscos que são comuns aos diferentes métodos construtivos; no entanto as suas consequências podem ser distintas, pelo que o método a que é associado determinado risco é aquele que apresentará eventualmente as consequências mais gravosas.



**Quadro 3.5. Principais riscos geotécnicos relativos ao método construtivo (excerto do Anexo I – Quadro I.B).**

Risco	Método	Sim	Não	Obs.
<b>Deterioração do maciço remanescente</b> Sobreescavação e sobrefracturação, com o consequente aumento da permeabilidade do maciço.	Explosivos			
<b>Redução do tempo de auto-sustentação</b> Devido à cobertura reduzida e/ou comprimento do vão não suportado excessivo e/ou ocorrência de singularidades geológicas ( <i>e.g.</i> , zonas de falha), descompressão anormal do maciço, sustimento insuficiente nas proximidades da frente de escavação, inadequada parcialização da frente.	Ataque pontual <sup>6</sup> e explosivos			

<sup>6</sup> Ataque pontual (escavação com: roçadoras, retroescavadoras, martelo hidráulico ou pneumático).

## 3.2 AVALIAÇÃO DO RISCO

Após a identificação dos possíveis perigos geotécnicos presentes em obra e respectivo arquivo no RR, se for esse o caso, passa-se à terceira etapa GeoQ (Staveren, 2006), a avaliação do risco. Esta etapa inicia-se com a análise dos riscos identificados. Contempla a estimativa da probabilidade de ocorrência e identificação e estimativa das consequências; seguidamente procede-se à convolução desses dois pontos, donde resulta a estimativa do risco. Uma vez obtida, é necessário verificar a sua aceitabilidade/tolerabilidade, através do princípio *ALARP* ou com recurso a matrizes de risco.

A avaliação do risco geotécnico, requer o uso de ferramentas adequadas como são as diversas técnicas de análise. A maioria destas são desenvolvidas para aplicações fora da indústria de construção subterrânea; no entanto, também podem ser utilizadas para os problemas encontrados na construção de túneis, sem grandes adaptações.

### 3.2.1 Análise do risco

De acordo com o CNPGB (2005), as análises de riscos podem classificar-se em: qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas.

A análise qualitativa baseia-se na simples classificação dos riscos, de acordo com a sua magnitude. Tanto a probabilidade como a consequência de cada risco podem ser classificadas de forma rápida, fácil e simples, através de uma forma escrita, descritiva ou escalas de ordenação numérica para descrever a grandeza de consequências potenciais e a verosimilhança da ocorrência dessas consequências (*op. cit.*). No entanto não permitem avaliar a importância relativa entre os vários riscos identificados.

Quando a estas se adiciona um certo grau de quantificação (*e.g.*, aplicando uma árvore de eventos para quantificar as probabilidades de ocorrência), passam a ser designadas de

análises semi-quantitativas. Estas permitem um escalonar relativo dos riscos do sistema. Recorrem igualmente a classificações (*e.g.*, elevado, provável, médio, reduzido, etc.) e/ou a índices (*e.g.*, de 1 a 5) para caracterizar a magnitude das consequências e a verosimilhança da ocorrência dessas consequências; contudo, continuam a ser incapazes de fornecer avaliações detalhadas relativamente à segurança do sistema (Santos, 2006).

As análises quantitativas, como o nome indica, são baseadas em valores numéricos, das probabilidades e das consequências potenciais, *i.e.*, são capazes de disponibilizar estimativas numéricas dos riscos, permitindo avaliar a importância relativa entre eles e que tais valores sejam uma representação válida da grandeza real das consequências e da probabilidade dos vários cenários que são examinados.

Assim, as análises qualitativas, são subjectivas, daí que a sua utilidade seja menor, enquanto que as quantitativas tendem a ser mais objectivas; daí que exista um maior interesse por estas últimas, uma vez que, se forem bem realizadas, possibilitam uma melhor interpretação dos resultados.

A intenção deste subcapítulo é expor uma breve síntese e exemplificação de 3 técnicas (árvore de falhas, de eventos e classificação de riscos) com possível aplicação na construção de túneis.

### 3.2.1.1 Árvore de falhas (FTA)

A análise por árvore de falhas é um método da Engenharia de sistemas utilizado para representar, de forma gráfica, a ocorrência (ou não) de um conjunto de eventos que, conjugados de uma determinada forma lógica, originam a ocorrência de um outro indesejado, pré-seleccionado, denominado para evento de topo, por estar localizado no topo de uma árvore de falhas. Trata-se assim, de um modelo dedutivo (funciona do geral para o mais específico), postulado que o sistema em análise sofreu uma rotura e tenta-se descobrir quais as causas iniciais que contribuíram para ela. É uma técnica que pode ser aplicada, quer qualitativa, quer quantitativamente.

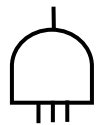


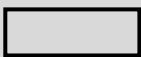
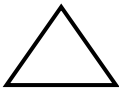
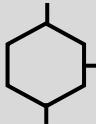
As suas características principais são as seguintes:

- ✓ Modelos das possíveis combinações de falhas nos equipamentos, erros humanos, e condições externas que podem levar a um tipo específico de acidente;
- ✓ Utilizado na maioria das vezes como uma técnica de avaliação do nível de risco do sistema;

- ✓ Inclui os erros humanos e a causa das falhas;
- ✓ Realizada, em primeiro lugar, por trabalho individual, com especialistas do sistema, através de entrevistas e inspecções de terreno;
- ✓ É uma técnica de avaliação de risco que gera:
  - Descrições qualitativas dos problemas potenciais e combinações de eventos que causam problemas específicos de interesse;
  - Estimativas quantitativas das frequências e probabilidades de rotura, e importâncias relativas das sequências das várias falhas e eventos;
  - Listas de recomendações para reduzir os riscos;
  - Avaliações quantitativas da eficácia dessas recomendações.

A análise por árvore de falhas é um método que recorre a um conjunto de símbolos lógicos, normalizados, que caracterizam a relação entre os vários eventos (Quadro 3.6).

**Quadro 3.6. Alguns símbolos lógicos utilizados na construção de árvores de falhas (CNPGB, 2005, adaptado).**

Símbolo lógico	Designação	Observações
	Porta E	O evento de saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem.
	Porta OU	O evento de saída ocorre se ocorrer pelo menos um dos eventos de entrada.
	Acontecimento iniciador	Evento elementar com potencial directo ou indirecto para originar a falha em análise.
	Evento	Evento que resulta da associação lógica de outros eventos.
	Símbolo de transferência	Evento que resulta de outra árvore de falhas.
	Porta Condicional	O evento de saída é resultado do evento de entrada se o evento condicional ocorrer.

A árvore de falhas funciona, de trás para a frente, *i.e.*, conhecido o evento de topo retrocede-se, progressivamente, de maneira a perceber quais os seus eventos originadores (eventos primários). Utilizando operadores lógicos do tipo E, OU ou NEGAÇÃO, vão sendo

registadas as combinações e interações entre a ocorrência desses eventos, de estados intermédios (eventos intermédios), que conduzem ao evento de topo.

Os procedimentos gerais de aplicação do método FTA são os seguintes (CNPGB, 2005):

- ✓ Identificação da falha que se pretende analisar;
- ✓ Construção da árvore de falhas;
- ✓ Interpretação da árvore de falhas.

A construção e a interpretação de uma árvore de falhas, um conceito aparentemente simples, pode transformar-se num exercício bastante complicado, função da complexidade do sistema em análise. Um conjunto de regras e técnicas de análise, assim como de programas de cálculo automático para apoio à sua implementação, podem ser encontrados na bibliografia da especialidade. Santos (2006) faz uma descrição dos procedimentos para a construção de árvores de falhas referindo as suas etapas e um conjunto de regras base.

A interpretação da árvore de falhas pode ser desenvolvida de forma qualitativa ou quantitativa. Em qualquer dos casos deve eliminar-se previamente sequências de eventos redundantes e identificar-se os conjuntos mínimos de acontecimentos iniciadores que determinam a ocorrência da falha e os caminhos críticos. Uma interpretação qualitativa parte, em geral, do pressuposto de que todos os acontecimentos iniciadores são equiprováveis analisando, em seguida, quais os que determinam sequências de eventos que se propagam através de portas lógicas do tipo “OU” (os que mais facilmente conduzirão à falha do sistema) e quais os que originam essencialmente sequências que se propagam através de portas lógicas “E” (os que mais dificilmente conduzirão à falha do sistema). Por outro lado, quanto mais pequeno for o conjunto mínimo, mais facilmente ocorrerá a falha do sistema.

Não se verificando a equiprobabilidade dos acontecimentos iniciadores, uma análise qualitativa resulta bastante mais falível, sendo aconselhável que esta seja complementada com interpretações semi-quantitativas ou quantitativas. Estas visam estimar a probabilidade da falha em análise e das sequências e combinações de eventos, a partir da probabilidade de ocorrência dos acontecimentos iniciadores (CNPGB, 2005).

Tal como outros métodos de análise, este também tem vantagens e desvantagens (Quadro 3.7).

**Quadro 3.7. Vantagens e desvantagens da utilização da FTA (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000b; adaptados).**

Vantagens	Desvantagens
Modelação e análise dos modos de rotura de sistemas complexos numa forma lógica e com uma estrutura gráfica de fácil interpretação.	Demasiado centrado num único tipo de evento. Numa árvore de falhas selecciona-se apenas um possível acidente de interesse. Para se analisar outros têm de ser desenvolvidas outras árvores de falhas.
Utilização, aceitação e estado de desenvolvimento do método, em diferentes ramos de Engenharia, para avaliação da fiabilidade dos seus sistemas.	Compreensão de árvores de falhas de grandes dimensões: naquelas com muitos eventos e com várias e diferentes portas lógicas podem ser difíceis de avaliar quais os eventos com maior importância para a ocorrência do evento de topo.
Possibilidade de tratar de forma eficiente a modelação de um grande número de eventos e a forma como as suas combinações podem originar a rotura do sistema.	Falta de unicidade das árvores de falha: o nível de detalhe, os tipos de eventos incluídos numa árvore e a sua organização podem variar em função do analista que a concebe.
Possibilidade de utilizar softwares comerciais sofisticados que tornam a construção, a documentação e a avaliação da árvore de falhas numa tarefa eficiente e fácil de gerir.	A quantificação de uma árvore requer uma significativa recolha de dados (resultados de observação das obras, realização de ensaios laboratoriais, e de campo); sem isto pode não ser possível obter probabilidades de ocorrência dos eventos primários.
Realização de análises de sensibilidade aos eventos primários causadores da rotura do sistema.	Morosidade da sua aplicação, existindo actualmente diversos programas de cálculo automático comerciais que permitem facilitar a construção gráfica, a procura dos conjuntos mínimos e a estimativa das probabilidades.
Possibilidade de efectuar avaliações qualitativas e quantitativas.	-

As condições geotécnicas, como tem vindo a ser salientado, têm um papel importante na construção do túnel. No entanto, elas raramente são a única razão para a ocorrência de uma rotura. Normalmente, é uma combinação de factores que leva a um colapso, muitas vezes um erro de gestão ou de projecto.

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam um exemplo de uma FTA quantitativa que têm como evento de topo o colapso da secção de um túnel (Šejnoha *et al.*, 2009). Neste caso, a estimativa inicial foi determinada através de análises anteriores que fornecem a intensidade ( $\lambda$ ) do evento de topo (*e.g.*, para o caso de colapso de uma secção, é o número total de colapsos ocorridos na República Checa desde 1990, dividido pelo comprimento total de túneis). Os valores de entrada sugeridos devem ser especificados e particularizados para o túnel em questão. No caso, de as condições variarem significativamente ao longo do seu comprimento, é apropriado analisar separadamente diferentes secções do túnel. O risco total é a soma dos riscos de cada uma das diferentes secções analisadas. A determinação dos valores de entrada para os eventos geotécnicos básicos é possível com a ajuda de

modelos probabilísticos, nomeadamente modelação estocástica de parâmetros geotécnicos com características homogéneas ou não, ao longo do eixo do túnel, ou então através de software apropriado.

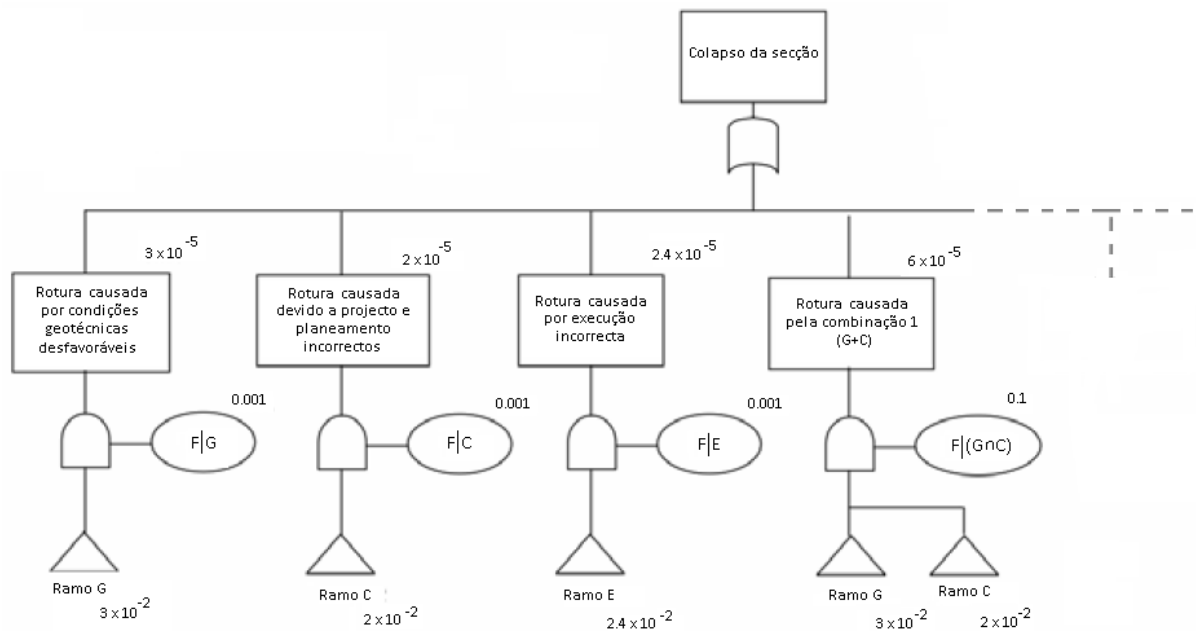


Figura 3.4. FTA de colapso da secção do túnel (Šejnoha *et al.*, 2009, adaptado).

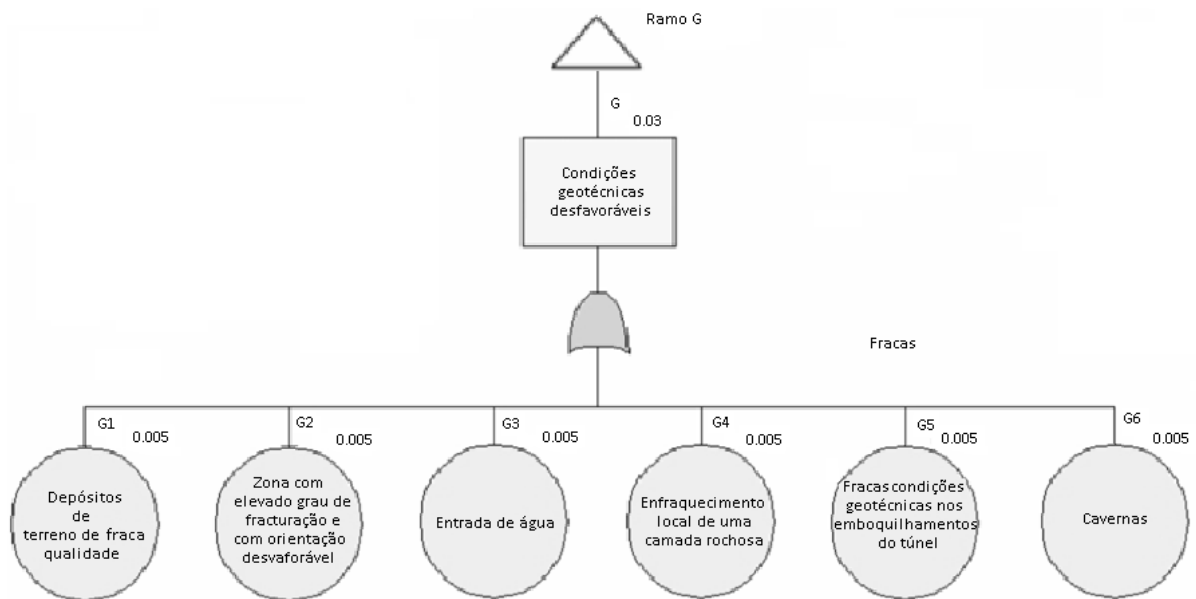


Figura 3.5. Detalhe do ramo G, condições geotécnicas desfavoráveis (Šejnoha *et al.*, 2009, adaptado).

Os ramos da FTA são estruturados individualmente, para cada tipo de evento negativo. O ramo G (Figura 3.5) do caso em análise diz respeito às condições geotécnicas desfavoráveis. Estas condições ocorrem em 3% do comprimento do túnel, a intensidade da rotura ( $\lambda$ ) foi avaliada em  $0,001 \text{ m}^{-1}$ , isto pode ser interpretado como um provável colapso da secção, causado apenas pela geologia desfavorável ao longo de um comprimento de 1000 m, isto se

as condições de projecto, planeamento, gestão e outros processos forem adequados. A contribuição deste ramo para a intensidade total é então  $\lambda_1 = 0,03 \times 0,001 = 3 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . A partir da intensidade pode-se calcular a probabilidade de colapso ou de ocorrência ( $P[\text{Evento}]$ ) de uma secção do túnel, com determinado comprimento, através da distribuição de *Poisson*; posteriormente, as possíveis consequências podem ser analisadas com a ajuda de uma árvore de eventos ETA a descrever no subcapítulo seguinte. Este detalhe extrapola os objectivos do presente trabalho e não irá ser aprofundado, sugerindo-se a consulta de Šejnoha *et al.* (2009), para complemento.

No futuro, estas análises deverão ser elaboradas para cada projecto de túnel. Além disso devem ser estabelecidas bases de dados de árvores de falhas para túneis sob diferentes condições. A FTA pode ser utilizada para a avaliação das diferentes opções, onde a influência dos seguintes factores podem ser estudados (Šejnoha *et al.*, 2009):

- ✓ Condições geotécnicas determinadas pelo alinhamento do túnel;
- ✓ Método de escavação;
- ✓ Qualidade do Empreiteiro;
- ✓ Qualidade do Projectista; e
- ✓ Qualidade das outras partes envolvidas.

### 3.2.1.2 Árvore de eventos (ETA)

A análise por árvore de eventos constitui um processo indutivo que, como o nome indica, utiliza a construção gráfica em forma de árvore de eventos, na qual se mostra a sequência lógica da ocorrência de eventos num sistema, ou em estados do mesmo, a partir de um evento iniciador. Permite ilustrar as consequências intermédias e finais susceptíveis de ocorrer, após o surgimento de um acontecimento inicialmente seleccionado. O número de resultados finais possíveis depende das várias opções, aplicadas na sequência do evento iniciador.

Tratando-se de um método indutivo de análise dos possíveis resultados a partir de um determinado acontecimento iniciador, esta árvore é particularmente adequada para a análise de sistemas que integrem diversas componentes/dispositivos de segurança. Pode ser utilizada como uma técnica de análise que examina, de uma forma sistemática, os procedimentos e dispositivos existentes em obra (de detecção, de alarme, de prevenção, de

protecção ou de intervenção) capazes de evitar que os fenómenos precursores de acidentes se desenvolvam e provoquem roturas.

O método permite calcular a probabilidade de ocorrência de sequências de eventos, podendo assim ser aplicado no âmbito das análises semi-quantitativas e quantitativas. É importante quantificar e analisar essa probabilidade, de modo a antever todos os riscos prováveis. Procedimentos perigosos relacionados com a construção podem ser detectados e removidos durante este processo. O método pressupõe que se consigam identificar, para cada subsistema em análise, os acontecimentos iniciadores que podem conduzir a falhas, designadamente àquelas relevantes para o comportamento global do sistema.

As características principais são as seguintes:

- ✓ É uma técnica que gera:
  - As descrições qualitativas dos problemas potenciais como combinações de eventos que produzem vários tipos de problemas (gama de resultados) de eventos iniciadores;
  - Estimativas quantitativas de frequências ou probabilidades de eventos e importância relativa das sequências de várias falhas e eventos contribuidores;
  - Listas de recomendações para reduzir os riscos;
  - Avaliações quantitativas da eficácia dessas recomendações.
- ✓ Executado em primeiro lugar por um trabalho individual, por especialistas no assunto, através de entrevistas e inspecções de terreno;
- ✓ Os modelos da gama de possíveis acidentes resultam de um evento inicial ou categoria de eventos iniciadores;
- ✓ Técnica de avaliação que contribui efectivamente para a dependência e efeito dominó entre os vários contribuidores de acidentes, ao contrário do modelo de árvores de falhas.

Os procedimentos de aplicação do método são os seguintes (CNPGB, 2005):

- ✓ Identificação do acontecimento iniciador a analisar;
- ✓ Construção da árvore de eventos a partir do pressuposto de que cada ramo da árvore dá origem a dois ramos, que representam: um, a situação de sucesso, e outro, a



situação de falha; cada sequência de eventos culmina numa situação que pode ou não corresponder a uma falha;

- ✓ Cálculo da probabilidade de ocorrência de cada sequência de eventos, ou seja, de todas as situações de falha, através da estimativa de probabilidades de sucesso e falha de cada evento, no caso de análises semi-quantitativas ou quantitativas.

Tal como os outros métodos, este possui vantagens e desvantagens que se enumeram no Quadro 3.8.

**Quadro 3.8. Vantagens e Desvantagens da ETA (Santos, 2006; United States Coast Guard, 2000c; adaptado).**

Vantagens	Desvantagens
O facto de ser um método de representação gráfica torna-o particularmente atractivo, evidenciando as sequências lógicas dos eventos ou estados do sistema.	Limitado a um evento inicial. Uma árvore de eventos não é uma abordagem exaustiva para a identificação de várias causas que podem originar um acidente.
A identificação dos acontecimentos iniciadores de maior impacto potencial no sistema permitirá reduzir significativamente o tempo e respectivos custos de aplicação deste método.	Pode ignorar certas dependências no sistema, levando a estimativas excessivamente optimistas de risco. Em cada ramo de uma árvore de eventos, os caminhos estão condicionados pelos acontecimentos ocorridos nos pontos de ramificação anteriores ao longo dessas trajetórias.
Determinação altamente eficaz da forma como os diferentes eventos iniciadores podem resultar em acidentes de interesse.	Tempo e custos de aplicação deste método podem constituir obstáculos à sua utilização.
A sua elaboração poderá acompanhar o desenvolvimento do projecto e ser alterada ou actualizada sempre que surjam novos dados ou alterações de projecto ou de construção.	Os acontecimentos iniciadores relevantes para a análise em questão têm de ser identificados previamente à análise.
Identifica e dimensiona medidas de mitigação e riscos.	-

Hong *et al.* (2009) apresentam um exemplo de uma ETA elaborada para um trecho do túnel Bundang, Coreia do Sul, sob o rio Han, escavado com recurso a uma tuneladora *Earth Pressure Balance* (EPB). Esta avaliação quantitativa dos riscos foi construída na respectiva fase de estudo prévio para identificar problemas que poderiam advir durante a construção. Naquela fase de estudo foram analisadas as sequências prováveis dos eventos iniciadores, e seleccionadas acções mitigadoras adequadas, para garantir a segurança contra os riscos. A árvore de eventos é composta por cinco acções de mitigação que, por sua vez, dão origem a 32 caminhos possíveis; posteriormente, é calculada a probabilidade para cada caminho. A selecção dos eventos iniciadores é a etapa mais importante da ETA. Neste estudo, os eventos iniciadores foram seleccionados com base numa lista de verificação elaborada através da recolha de dados e resultados de análises anteriores, em projectos semelhantes.

Como resultado, foram identificados os eventos iniciadores que poderiam ser encontrados durante a construção deste túnel; de entre eles destaca-se o terreno com características desfavoráveis. Este evento diz respeito à ocorrência de zonas de falha, fracturas e zonas de baixo recobrimento (Figura 3.6); tais zonas podem originar: afluxo de água e de solo para o interior do túnel, baixa eficiência de escavação, danos nos discos de corte, encravamento da tuneladora, impactes no custo e cronograma dos trabalhos.

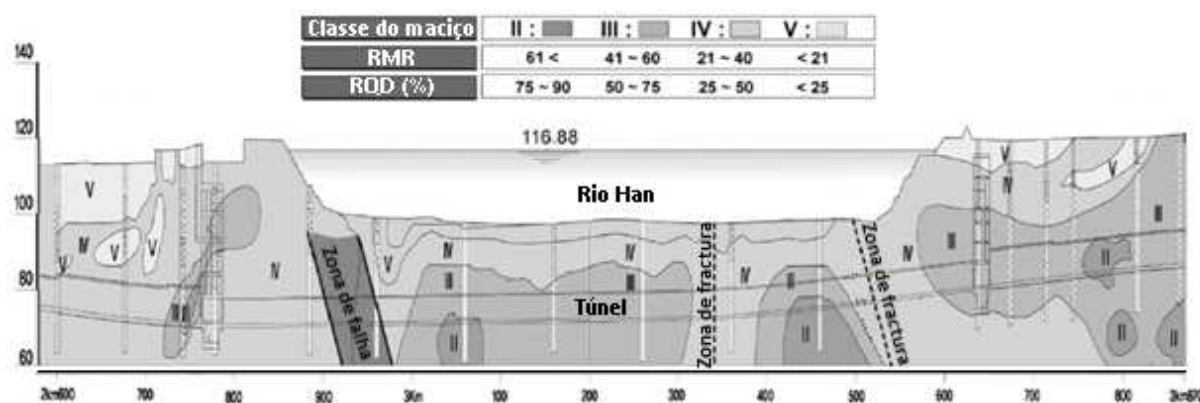


Figura 3.6. Condições geotécnicas do trecho do túnel Bundang (Hong *et al.*, 2009, adaptado).

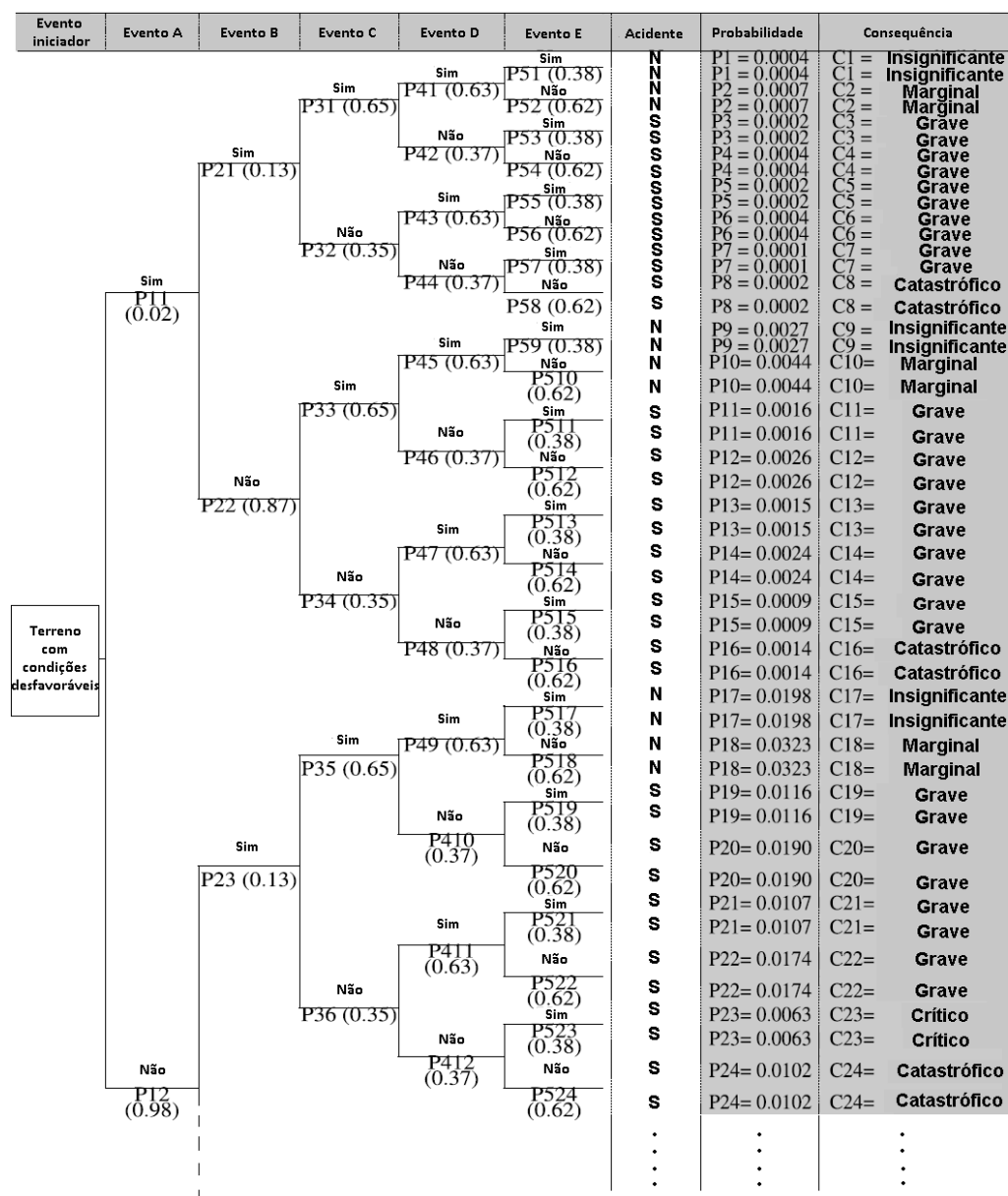
A Figura 3.7 exemplifica um excerto da estrutura da árvore de eventos constituída para a análise de cinco componentes de segurança (acções de mitigação) para o caso da ocorrência de terreno com condições desfavoráveis. O sucesso ou fracasso (acidente é evitado, ou não, pela acção de mitigação) desta função de segurança é identificado como “Sim” ou “Não” no início de cada ramo da árvore de eventos. Na Figura 3.7 são também mostrados os processos de avaliação de acidentes, respectivas probabilidades e consequências na obra.

Os eventos subsequentes prováveis são independentes uns dos outros, o resultado final específico depende apenas do evento inicial e dos acontecimentos subsequentes ulteriores. Portanto, a probabilidade de ocorrência de um caminho específico pode ser obtida multiplicando as probabilidades de todos os eventos subsequentes existentes nesse caminho. Por exemplo, para P3 é  $P(ABC\bar{D}E \mid \text{terreno com condições desfavoráveis}) = (P11) \times (P21) \times (P31) \times (P42) \times (P53) = 0,02 \times 0,13 \times 0,65 \times 0,37 \times 0,38 = 0,0002$ , onde as letras maiúsculas sem barra por cima são casos de sucesso e com barra por cima é de insucesso.

A classificação da magnitude dos riscos é representada de C1 a C32. Estes são classificados em cinco níveis de magnitude/impacto (catastrófico, crítico, grave, marginal, insignificante). Com base nos resultados da ETA, verificou-se que o local escolhido, para a construção do

túnel sob o rio Han, continha uma probabilidade considerável para a ocorrência de acidentes, apesar das contramedidas implementadas. Deste modo, foi proposto intervir na redução das probabilidades para baixar também a eventual ocorrência de desastres durante a construção.

Para um aprofundamento dos conhecimentos sobre este tipo de análise, sua construção e interpretação, sugere-se a consulta de Pimenta (2008) e Hong *et al.* (2009).



#### Evento:

- A – prospeção geotécnica/projecto, (e.g., administrar um plano de escavação piloto para definir as condições do terreno);
- B – processo de planeamento (e.g., controlo da sequência de escavação – escavar a zona fracturada em avanço minimizando a probabilidade de rotura);
- C – tipo de máquina de construção (e.g., impermeabilização do rolamento principal e de componentes mecânicos críticos; instalação de instrumentação para detectar pressões e assentamentos, que possam levar ao colapso);
- D – gestão da construção (e.g., controlo da taxa de avanço, rotação e pressão da cabeça corte);
- E – reforço (e.g., injeção de caldas).

**Figura 3.7. Árvore de eventos (ETA) para terreno com condições desfavoráveis no túnel Bundang (Hong *et al.*, 2009, adaptado).**

### 3.2.1.3 Classificação do risco

#### a) Motivação

Segundo TGN25 (2009), a determinação da posição relativa de cada risco geotécnico deve ser efectuada através de técnicas de avaliação semi-quantitativa ou qualitativa de risco.

O objectivo da análise qualitativa é permitir à equipa de gestão priorizar os riscos de uma maneira simples e rápida, sem perder muito tempo na determinação do seu valor exacto. Daí que seja uma aproximação um pouco grosseira. A principal desvantagem desta abordagem reside no facto de esta não traduzir as incertezas associadas à sua determinação, atribuindo valores determinísticos para a verosimilhança e consequências de determinado evento.

A estimativa de risco é, então, efectuada através de escalas de verosimilhança e consequência. A sua multiplicação gera os valores de risco correspondentes a cada perigo. Como na maioria dos casos não há base para determinar tais parâmetros com exactidão, torna-se importante a avaliação subjectiva de um grupo de especialistas e o recurso a essas escalas. Uma avaliação bem documentada por especialistas é geralmente mais valorizada do que meros cálculos numéricos, pelo menos na área da Geotecnia (Schubert, 2004).

A verosimilhança de ocorrência e as consequências de cada risco devem ser avaliadas de acordo com um sistema de classificação relativa criado especificamente para atender às exigências e dimensão da obra. Também o sistema de classificação de risco deve ser estabelecido, com base na valoração da verosimilhança e da consequência de um determinado perigo fornecendo uma classificação de risco, indicando as acções (medidas mitigadoras mais apropriadas), a seleccionar de acordo com o nível de risco.

A escala de risco é um intervalo numérico definido e fixado com base na análise de risco:

- ✓ Valores mais baixos da escala correspondem à verosimilhança baixa que o risco se concretize;
- ✓ Valores mais elevados correspondem à verosimilhança elevada que o evento adverso se torne real.

Uma classificação deve contemplar as seguintes características (Longo & Gama, 2004):

- ✓ Facilidade de compreensão;
- ✓ Acessibilidade/disponibilidade, a todos os intervenientes no projecto e execução;

- ✓ Permanente evolução, baseando-se nos novos resultados obtidos a partir de novas sondagens e da observação do comportamento real.

Schubert (*op. cit.*) refere que em comparação com outras áreas, a “probabilidade” de ocorrência dos riscos mais comuns em túneis, é relativamente elevada, sendo aceite pela comunidade envolvida na construção deste tipo de obras. Eventos com uma verosimilhança de ocorrência muito baixa, dificilmente podem ser avaliados com confiança, devido à falta de dados estatísticos fiáveis, bem como da dificuldade em comparar as condições de fronteira de projectos diferentes.

Uma classificação, para ser plenamente eficaz, deve ser realizada logo nas fases preliminares de projecto, de forma a fornecer sugestões aos Projectistas para o melhorar ulteriormente. A classificação do risco não termina com o final do projecto. Durante a monitorização dos riscos (que acompanha a obra até à sua conclusão), a sua classificação permite identificar as áreas onde se deve aumentar o controlo por causa do risco ser mais elevado, bem como onde pode ser aligeirado.

Os principais motivos que levam à realização de uma classificação do risco são (Longo & Gama, 2004):

- ✓ Minimização dos riscos - Uma classificação dos riscos permite executar os trabalhos com maior segurança porque estão reconhecidas as áreas mais vulneráveis e sensíveis;
- ✓ Provável redução dos custos da obra, pelos dois motivos seguintes:
  - Optimização do uso dos equipamentos de monitorização;
  - Redução do risco de eventos perigosos que, como referido, criam frequentemente um aumento exagerado dos custos totais da obra;
- ✓ Provável redução dos tempos de realização - Uma das consequências mais comuns de um acidente ou de um dano é o bloqueio dos trabalhos ou a redução das tarefas. O prolongamento do tempo necessário para acabar a realização da obra é dificilmente recuperável e traduz-se num aumento de custos. Reduzir a verosimilhança de ocorrência de eventos negativos reduz, proporcionalmente, a eventualidade de prolongamento dos tempos de realização.

## b) Verosimilhança de ocorrência

A verosimilhança da ocorrência de determinado risco é bastante difícil de avaliar com exactidão. Eskesen *et al.* (2004) referem que a classificação da “probabilidade” pode ser realizada com recurso a estatísticas publicadas (nos poucos casos em que elas estejam disponíveis), ou com base no parecer de profissionais provenientes da equipa de projecto ou entidades colaboradoras no processo. A forma que propõem para a avaliação da “probabilidade” de ocorrência é incluir na equipa de avaliação de riscos, técnicos especializados na construção de túneis, para formular as suas próprias orientações sobre as classes de “probabilidade”. Geralmente é recomendada uma separação em cinco classes ou intervalos, como uma forma prática de graduar as verosimilhanças de ocorrência. Esta classificação pode ser obtida através da relação entre o número de ocorrências, “por ano” ou “por 1000 m de túnel”. No entanto, parece mais adequado utilizar uma classificação que relacione o número potencial de eventos durante todo o período de construção.

O estudo descrito por Shahriar *et al.* (2008) segue esta classificação (Quadro 3.9). Neste exemplo foi seleccionada a tuneladora mais apropriada para a escavação do túnel hidráulico *Nosoud*, no Irão (lote 2), com 48 km de comprimento e cerca de 6,73 m de diâmetro. Tal foi possível através de uma análise por árvore de decisão (ver 3.3.3.2), na qual entraram vários critérios, entre os quais uma avaliação qualitativa do risco geotécnico. Os principais perigos geotécnicos identificados ao longo do alinhamento do túnel foram: a abrasividade e dureza da rocha, a instabilidade da frente e das paredes do túnel, existência de cavidades cársticas, zonas de falhas, fluência de terreno e afluxo de água. A estes perigos foram aplicadas medidas mitigadoras (ver 3.3.1).

**Quadro 3.9. Classificação da verosimilhança de ocorrência dos perigos geotécnicos no túnel *Nosoud* (Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Verosimilhança	Classificação	Descrição da probabilidade do evento
Improvável	1	É extremamente improvável que ocorra uma vez
Remota	2	É improvável que ocorra uma vez
Provável	3	É provável que ocorra pelo menos uma vez
Admissível	4	É provável que ocorra mais que uma vez, mas raramente
Frequente	5	É provável que ocorra frequentemente

## c) Consequências da ocorrência

O impacto avalia as consequências para a obra da ocorrência do risco previsto. Os impactos mais severos são aqueles que provocam acidentes com danos humanos ou materiais avultados; inversamente os menores são aqueles que podem ser controlados através da aplicação de medidas mitigadoras que, em casos mais severos, se podem tornar bastante dispendiosas. Eskesen *et al.* (2004) recomendam que as consequências sejam agrupadas em cinco classes ou intervalos. A selecção dos tipos de consequência varia de acordo com o âmbito e a natureza do projecto. O exemplo de Shahriar *et al.* (2008) está em linha com esta prática geral (Quadro 3.10).

**Quadro 3.10. Classificação das consequências da ocorrência dos perigos geotécnicos no túnel *Nosoud* (Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Consequência	Classificação	Descrição
Insignificante	1	Evento não provoca quaisquer danos ou atrasos
Moderado	2	Evento provoca danos menores e/ou atrasos até 2 dias
Grave	3	Evento provoca danos reparáveis e/ou atrasos até 1 semana
Crítico	4	Evento provoca danos reparáveis significantes e/ou atrasos entre 1 a 2 semanas
Catastrófico	5	Evento provoca danos irreparáveis e/ou atrasos superiores a 2 semanas

Atribuindo às verosimilhanças e às consequências escalas idênticas (de 1 a 5), introduz-se simplicidade no processo, o que torna directa a priorização do valor de risco. O conhecimento dos eventuais extremos de risco é muito mais importante do que a exactidão dos detalhes.

## d) Estimativa do risco

No Quadro 3.11 apresentam-se os níveis de risco geotécnico correspondentes à possível aplicação de três tuneladoras para maciços rochosos (TBM sem escudo, de escudo simples e de escudo duplo), no túnel já referido, *Nosoud*, no Irão.

A classificação das verosimilhanças de ocorrência e das consequências para cada perigo geotécnico, em função do tipo de TBM, foram obtidas segundo uma abordagem qualitativa, através da consulta de especialistas no ramo e de acordo com os quadros apresentados anteriormente. Como se pode observar, a TBM com escudo simples e a TBM com escudo duplo apresentam os mesmos valores de risco. Aquele valor advém do produto da verosimilhança de ocorrência pelas consequências.

**Quadro 3.11. Classificação dos riscos geotécnicos utilizada para a escavação do túnel *Nosoud* com três tipos de TBM para maciços rochosos (Khademi, 2006 in Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Nº	Perigos geotécnicos	Verosimilhança de ocorrência	TBM sem escudo		TBM escudo simples		TBM escudo duplo	
			Consequência	Risco	Consequência	Risco	Consequência	Risco
1	Rocha dura e abrasiva	4	2	8	2	8	2	8
2	Elevado afluxo de água	4	4	16	2	8	2	8
3	Paredes instáveis	4	5	20	3	12	3	12
4	Frente instável	4	4	16	3	12	3	12
5	Cavidades cársticas	4	5	20	3	12	3	12
6	Zonas de falha	5	4	20	2	10	2	10
7	Fluência	4	1	4	2	8	2	8

Neste exemplo, a TBM mais adequada foi seleccionada com o intuito de minimizar os riscos geotécnicos durante a construção do túnel. A selecção baseada nesta avaliação foi a adoptada no final, mas considerando também outros aspectos como o custo final da obra, a duração da construção e a disponibilidade da máquina (Shahriar *et al.*, 2008).

### 3.2.2 Apreciação do risco

Uma vez obtida a estimativa do risco é necessário verificar a sua aceitabilidade/tolerabilidade. Esta pode ser verificada, no caso de uma análise qualitativa, através de matrizes de risco, cada vez mais aplicadas em projectos de túneis, um pouco por todo o mundo (Schubert, 2004). No Quadro 3.12 ilustra-se o caso da matriz de risco utilizada no túnel *Nosoud*, no Irão. A escala de cores está definida no Quadro 3.13.

**Quadro 3.12. Matriz risco para o túnel *Nosoud* (Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

		Consequência				
		Catastrófico	Crítico	Grave	Moderado	Insignificante
Verosimilhança	Frequente	25	20	15	10	5
	Esperado	20	16	12	8	4
	Provável	15	12	9	6	3
	Remoto	10	8	6	4	2
	Improvável	5	4	3	2	1



A matriz apresentada é entendida como uma base para a decisão sobre a aceitabilidade de cada risco considerado. O exemplo está em consonância com a prática geral, mas é importante notar que o sistema de classificação de risco deve ser definido particularmente para cada obra, tendo em conta a respectiva política de risco estabelecida.

Segundo Eskesen *et al.* (2004), o risco deve ser dividido em 4 classes: inaceitável, não desejável, aceitável e negligenciável. As acções a serem realizadas para cada risco dependem do resultado dessa classificação. Se o risco for inaceitável deve ser reduzido, pelo menos, para não desejável, independentemente dos custos envolvidos na sua mitigação. Para os riscos não desejáveis, devem ser identificadas medidas de mitigação. As medidas devem ser implementadas, desde que os seus custos não sejam desproporcionais à redução de risco obtida (princípio ALARP). Se o risco for aceitável deve ser gerido ao longo da obra pelo que não é necessário considerar a sua mitigação. Se for negligenciável, não são necessárias considerações sobre os perigos em causa. No Quadro 3.13 são apresentadas os diferentes níveis de risco, respectivo índice e critérios de aceitabilidade/tolerabilidade considerados no projecto do túnel *Nosoud*.

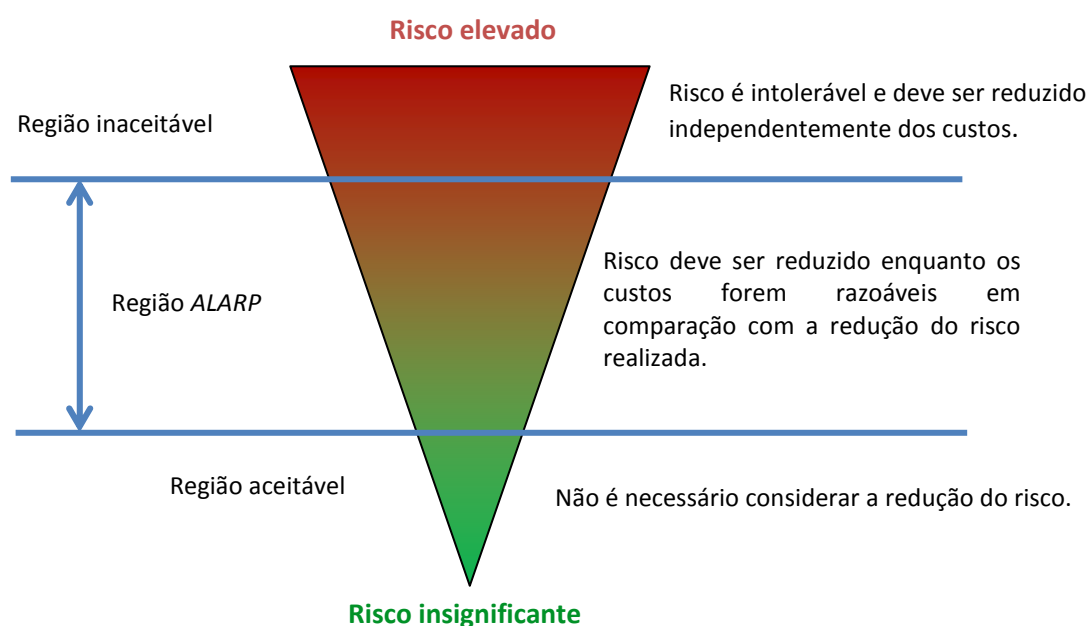
**Quadro 3.13. Índices de risco para o túnel *Nosoud* (Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Nível de risco	Índice	Descrição
Baixo	1-4	Risco é tolerável. Não é necessária qualquer mitigação.
Médio	5-9	Risco é moderadamente tolerável. Pode ser necessária mitigação.
Alto	10-15	Risco está na fronteira da tolerabilidade. Devem ser identificadas e implementadas medidas de mitigação para reduzir o risco.
Muito alto	16-25	Risco é intolerável. Devem ser implementadas medidas de mitigação para reduzir o risco.

Ao controlar a magnitude dos riscos decorrentes dos perigos individuais, o risco total envolvido no projecto é controlado sem levar em conta uma estimativa do risco total. Esta é uma condição prévia adoptada a fim de reduzir a verosimilhança de ocorrência, para que nesta abordagem não se subdivida indevidamente um perigo; *e.g.*, ao considerar trechos de 100 m de túnel, separadamente. Por outro lado, se a análise do risco foi efectuada segundo uma abordagem quantitativa, a aceitabilidade/tolerabilidade dos riscos calculados pode ser verificada através do princípio ALARP (Figura 3.8).

Para todos os riscos sujeitos a uma análise quantitativa é estabelecido (Eskesen *et al.*, 2004):

- ✓ Um limite acima do qual o risco é considerado inaceitável e, portanto, deve ser reduzido, independentemente do seu custo (limite de tolerabilidade);
- ✓ Um limite abaixo do qual não é necessário considerar uma redução adicional do risco (limite de aceitabilidade);
- ✓ Um espaço entre os dois limites onde as medidas mitigadoras devem ser consideradas de acordo com as circunstâncias, específicas, função dos objectivos fixados na política de risco, *i.e.*, os riscos são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a esta redução forem fortemente desproporcionados relativamente aos benefícios daí decorrentes (região ALARP).



**Figura 3.8. Adopção do princípio ALARP na definição de critérios de aceitabilidade e tolerabilidade do risco (Leca & Eskesen, 2006, adaptado).**

Quer este princípio, quer a matriz risco, devem ser aplicados antes da proposta das medidas mitigadoras, para avaliar o nível dos riscos e quais os que devem ser realmente mitigados. Para além disso e após a execução dessas medidas, serve para verificar se a sua redução foi realmente eficaz, *e.g.*, se a redução do risco que era inaceitável, o levou para a região ALARP, por outras palavras, se o risco residual é ou não, aceitável/tolerável, tornando-se deste modo um processo cíclico.

Assim sendo, os riscos de elevada magnitude devem ser tratados, primeiramente, uma vez que aumentam as possibilidades de sucesso do projecto e minimizam a incerteza associada. Os de baixa magnitude poderão ser desconsiderados num contexto de gestão, de modo a reduzir os recursos necessários e despendidos. Uma vez propostas as medidas de mitigação

e reduzido o risco, é importante identificar se essas medidas introduziram novos riscos para o projecto e se prejudicam o desempenho do sistema; se esse for o caso, são necessárias novas medidas. Como os recursos das empresas são limitados, os recursos para controlar os riscos são, também eles, limitados. A partir desta perspectiva, considera-se que uma solução é favorável apenas se os seus riscos são mais que compensados pelos seus benefícios (Flores, 2006). Em geral, devem ser analisadas a eficácia, viabilidade e custos das medidas mitigadoras. No processo de gestão do risco proposto por Staveren (2006), esta etapa de apreciação corresponde ao quinto passo do GeoQ realizado após tomadas as acções mais apropriadas para mitigar o risco.

Staveren (*op. cit.*) propõe que a apreciação do risco se desenvolva em duas etapas. A primeira é um processo de verificação do processo de gestão de risco aplicado até ao momento. A segunda é uma análise cuidadosa dos resultados das medidas de remediação de risco. Toma-se como exemplo o risco potencial de assentamentos à superfície induzidos pela abertura de um túnel. Durante esta etapa de avaliação, os assentamentos previstos devem ser comparados com a extrapolação dos resultados da monitorização desses assentamentos. Evidentemente, quanto maior for a diferença entre o risco inicial e o residual, em termos de verosimilhança e de consequências, mais eficazes serão as medidas de mitigação aplicadas.

Após esta etapa atinge-se, provavelmente, o final de uma fase particular do projecto de construção. É então necessário preparar todas as informações sobre os riscos, para serem utilizadas na próxima fase da obra, daí que todas as informações relevantes de risco tenham de ser mobilizadas. É aqui que chegamos à sexta e última etapa do processo GeoQ (Staveren, 2006). Nela, os resultados da avaliação de risco devem também eles ser registados num RR, e incluir planos de mitigação de risco geotécnico, estudos adicionais de campo/laboratório, e eventuais inspecções e acompanhamentos. Deste modo, ao analisar o grau de risco das actividades e eventos futuros, será possível identificar e discriminar quais os eventos que poderão ter maior influência na obra.

### 3.3 MITIGAÇÃO DO RISCO

Segundo o TGN25 (2009), a mitigação dos riscos geotécnicos tem por objectivo identificar e implementar acções custo/benefício, que irão eliminar os riscos identificados, ou reduzi-los

para níveis aceitáveis/toleráveis. Por outras palavras, é a exploração de estratégias de resposta aos riscos considerados de maior magnitude, e identificados na análise de risco qualitativa e/ou quantitativa. A identificação e avaliação do risco são a base para as medidas de resposta ao risco. O planeamento dessas respostas é um processo que implica o desenvolvimento de opções e determinação de acções, para aumentar oportunidades e reduzir ameaças aos objectivos do projecto. De seguida serão apresentadas diversas estratégias para mitigar o risco.

### 3.3.1 Definição de estratégias/prioridades

Segundo Staveren (2006), qualquer análise de risco é apenas um meio para se chegar às medidas correctivas adequadas (quarto passo do processo GeoQ). A equipa de desenvolvimento do projecto deve identificar qual a melhor estratégia a adoptar para cada um dos riscos identificados e avaliados para, em seguida, projectar acções específicas. Acções típicas envolvem: evitar, reduzir, transferir, aceitar ou partilhar os riscos ( Figura 3.9). A cada risco inventariado pode ser aplicada apenas uma ou a combinação de várias acções.

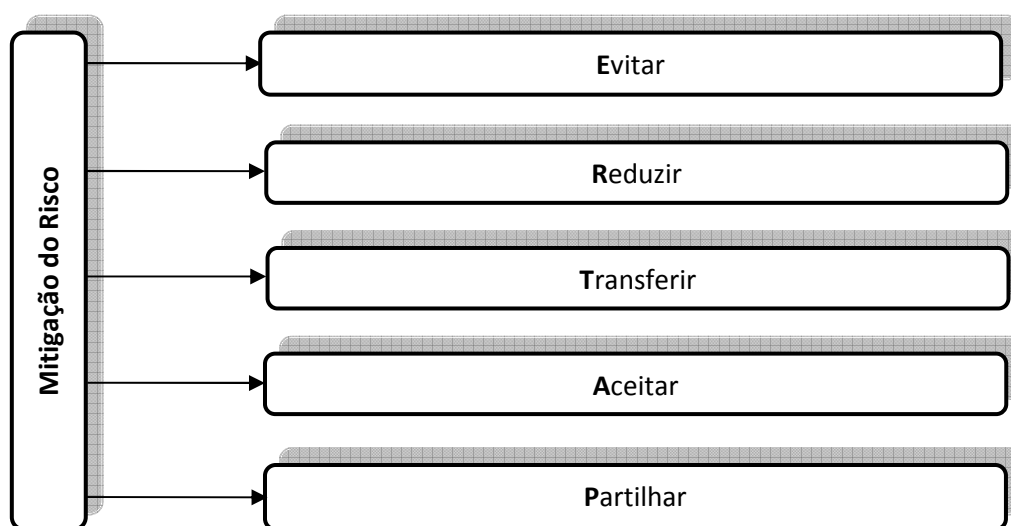


Figura 3.9. Estratégias de mitigação do risco.

**Evitar** os riscos é uma acção preferencial em Engenharia Subterrânea. Às vezes um risco é de tal magnitude que seria prudente o Dono de Obra evitá-lo a todo custo, com a opção de parar ou não realizar a obra. Este seria um caso extremo. Um exemplo, menos drástico, consistiria em escolher uma solução diferente de projecto. Esta última é, na maioria das vezes, realizada através de diferentes opções, quando disponíveis, de mudanças no

alinhamento horizontal, e/ou vertical, do túnel. Em certas circunstâncias, os constrangimentos ao longo do seu alinhamento não permitem flexibilidade na alteração do mesmo. Deste modo, devem ser consideradas outras medidas. Em qualquer caso, a decisão final depende do equilíbrio óptimo entre o risco e o custo/benefício das medidas adoptadas. Esta estratégia é normalmente utilizada se as opções de aceitação, redução e transferência, não forem exequíveis a um custo razoável. Este é o caso dos riscos com elevadas probabilidades de ocorrência e/ou com consequências muito graves.

A **redução** dos riscos tem como objectivo diminuir as consequências, a probabilidade de ocorrência, ou ambos, através de modificações de projecto, adicionando ou aumentando aspectos de segurança, incluindo dispositivos de alerta. Por exemplo, o Dono de Obra pode gastar dinheiro a tratar o terreno, antes de iniciar a construção do túnel. É certo que existe algum custo inicial, mas espera-se que o dinheiro gasto seja mais do que justificado face ao maior risco de construção, se o terreno não tivesse sido tratado.

Um projecto flexível desempenha um papel importante permitindo, quando possível, modificações na construção, apoiado no MO (ver 5.3.1). A instrumentação é bastante útil, actuando como medida preventiva ou correctiva, e pode ser definida antes da construção, activando as alterações preconizadas quando os limites de alerta forem atingidos. A redução do risco é particularmente importante para aqueles que possam atingir consequências potencialmente catastróficas. Aquando da redução dos riscos, devem ser adoptados cuidados especiais a fim de avaliar a geração de novos riscos, derivados das alterações ao projecto.

A **transferência** do risco muda apenas a responsabilidade ou propriedade de um risco. Ela deve ser considerada apenas quando a parte que o recebe é mais adequada para lidar com ele. Sem nenhuma acção adicional de remediação, o risco permanece o mesmo, desde que todos os factores de influência sobre ele permaneçam constantes. As cláusulas contratuais devem definir as responsabilidades na gestão dos riscos transferidos. É fortemente incentivada a utilização de RGR a fim de proporcionar uma definição clara das responsabilidades, quando se transferem riscos em obras subterrâneas, relativamente às condições geológicas inesperadas (Clayton, 2001 *in* Flores, 2006); (ver 4.4). Actualmente é usual a nível internacional, em projectos subterrâneos, transferir o risco para as companhias de seguros. O seguro deve ser entendido como uma medida de redução da incerteza em

troca de um prémio. Por outro lado, existem limitações, como o caso de certos riscos não serem cobertos pelo seguro, ou serem mas apenas até um determinado montante. Por estas razões, é importante considerar as seguradoras apenas como último recurso para os riscos que têm uma probabilidade de ocorrência baixa, mas com consequências potenciais catastróficas. Quanto maior for a probabilidade dos riscos avaliados, maior será também o prémio de risco pago às seguradoras.

A **aceitação** pode ser adequada para os riscos com baixa probabilidade de ocorrência e com efeitos limitados. Assim sendo, os riscos devem ser aceites quando (Flores, 2006):

- ✓ O seu valor for suficientemente baixo e não representar uma ameaça significativa para a empresa;
- ✓ Após uma análise custo/benefício considerar-se útil a sua aceitação/retenção;
- ✓ Não se conseguem identificar.

Existem dois tipos de estratégia de aceitação de riscos: a aceitação passiva e activa. Os riscos activos são aqueles que são identificados e conscientemente aceites e os quais se estão disposto a custear, aquando da sua materialização. A aceitação passiva de riscos inclui aqueles que não foram devidamente avaliados em termos de impacto, os inadequadamente geridos e os que não foram identificados. Isto aplica-se também aos chamados riscos residuais.

A **partilha** do risco entre o Dono de Obra e o Empreiteiro tem uma relação directa com o contrato de contingência, como parte da proposta do Empreiteiro. Por conseguinte, é importante identificar um mecanismo de partilha de riscos que seja justo e imparcial, e que permita uma contingência razoável por parte do Empreiteiro e um fundo de reserva suficiente, fornecido pelo Dono de Obra para tratar as condições imprevistas. Como o terreno lhe pertence, as condições imprevistas dele decorrentes são pagas por ele, se forem cumpridos determinados requisitos. Meios e métodos são geralmente de responsabilidade do Empreiteiro. A incapacidade de executar sob condições prescritas é um risco que deve ser assumido pelo Empreiteiro. Esta estratégia será novamente abordada adiante em 4.3.

Flores (2006) introduz uma outra estratégia de mitigação, a **parceria**. Muitos dos riscos que não foram identificados no projecto, vão surgir durante a construção e terão de ser tratados por profissionais, a fim de se atingir os objectivos globais dos intervenientes. A parceria é uma prática de gestão que ajuda a lidar com riscos não identificados, reforça as relações de

trabalho e evita um conflito contraditório que pode degenerar em resultados adversos. A confiança é um dos pilares da parceria. Através deste processo, são desenvolvidos uma série de diálogos e interações, onde os membros das diversas equipas intervenientes são encorajados a trabalhar as diferenças, para o melhor interesse do projecto. A adopção de práticas de parceria em projectos de túneis é altamente recomendada (*op. cit.*).

No caso apresentado por Shahriar *et al.* (2008), aos perigos geotécnicos identificados, se necessário, seriam aplicadas medidas mitigadoras (Quadro 3.14). Se a ocorrência destes perigos estava prevista antes do início da construção, as medidas de mitigação actuariam como métodos preventivos para minimizar o risco geotécnico.

**Quadro 3.14. Perigos geotécnicos e medidas de mitigação mais comuns (Shahriar *et al.*, 2006 in Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Perigos geotécnicos	Medidas de mitigação
Abrasividade/dureza	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Utilizar discos com dimensões maiores;</li> <li>✓ Utilizar aço mais resistente (tendo em consideração os custos);</li> <li>✓ Aplicar um torque mais elevado;</li> <li>✓ Fácil acesso à cabeça de corte;</li> <li>✓ Usar cabeças de corte com discos de corte substituíveis/acessíveis pela traseira da cabeça.</li> </ul>
Instabilidade das paredes do túnel (frequente em TBM sem escudo)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Usar sistemas de sustimento como cambotas metálicas e betão projectado atrás da cabeça de corte;</li> <li>✓ Pré-tratamento através de furos de injeção;</li> <li>✓ Revestimento do túnel com segmentos de betão pré-fabricados;</li> <li>✓ Utilizar TBM com escudo.</li> </ul>
Instabilidade da frente de escavação	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Pregagens em fibra de vidro (maciços diaclasados);</li> <li>✓ Betão projectado;</li> <li>✓ Criação de uma frente artificial;</li> <li>✓ Usar uma grade protectora na cabeça de corte.</li> </ul>
Cavidades cársticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Furos drenantes;</li> <li>✓ Preenchimento das cavidades;</li> <li>✓ Enfilagens.</li> </ul>
Zonas de falha	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sondagens na frente;</li> <li>✓ Melhoramento de terrenos;</li> <li>✓ Sustimento por segmentos;</li> <li>✓ Congelação;</li> <li>✓ Furos drenantes (zonas com elevada pressão de água);</li> <li>✓ Utilizar TBM com escudo.</li> </ul>
Fluência	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sobreescavação;</li> <li>✓ Uso de lubrificantes como bentonite;</li> <li>✓ Prevenção de falhas na máquina;</li> <li>✓ Aumentar a pressão nos macacos longitudinais.</li> </ul>
Afluxo de água	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sondagens na frente;</li> <li>✓ Drenagem;</li> <li>✓ Congelação;</li> <li>✓ Utilizar TBM com escudo;</li> <li>✓ Pré-injecções.</li> </ul>

Obviamente, cada uma das medidas de resposta potencial ao risco deve ser considerada tendo em conta a sua viabilidade, custos e os efeitos prováveis, nos riscos. Infelizmente, não há risco que seja gratuito. Cada medida de redução de risco tem um certo custo. No entanto, também podem surgir oportunidades interessantes que amortizem outros custos e talvez até proporcionem algum aumento de lucros (Staveren, 2006). Todas as acções de mitigação a realizar durante a construção devem ser traduzidas em planos de mitigação de riscos geotécnicos, constituindo instruções formais para os responsáveis designados tomarem medidas preventivas e de precaução quando os limites de controlo de riscos forem atingidos. A eficácia das acções deve ser continuamente avaliada até que os riscos tenham sido removidos ou reduzidos a níveis aceitáveis/toleráveis.

### **3.3.2 O papel da prospecção geotécnica**

#### **3.3.2.1 Durante o projecto**

Na construção subterrânea é particularmente importante prever as propriedades do terreno com a maior exactidão possível, uma vez que os erros podem ter consequências graves, no que respeita aos prazos e custos adicionais para a obra. O primeiro, e também o mais importante passo na redução dos riscos geotécnicos, é a realização de uma campanha de prospecção e ensaios adequada.

A chave para um bom entendimento do terreno é a elaboração de planos para a execução dos reconhecimentos ao longo do(s) alinhamento(s) previstos(s) e a sistematização da interpretação das condições geológicas, hidrogeológicas e sísmicas. É igualmente importante dispor de informações fiáveis sobre a localização e as características das infra-estruturas existentes no subsolo e à superfície, a fim de avaliar a sua eventual influência nos métodos de construção e as precauções a adoptar.

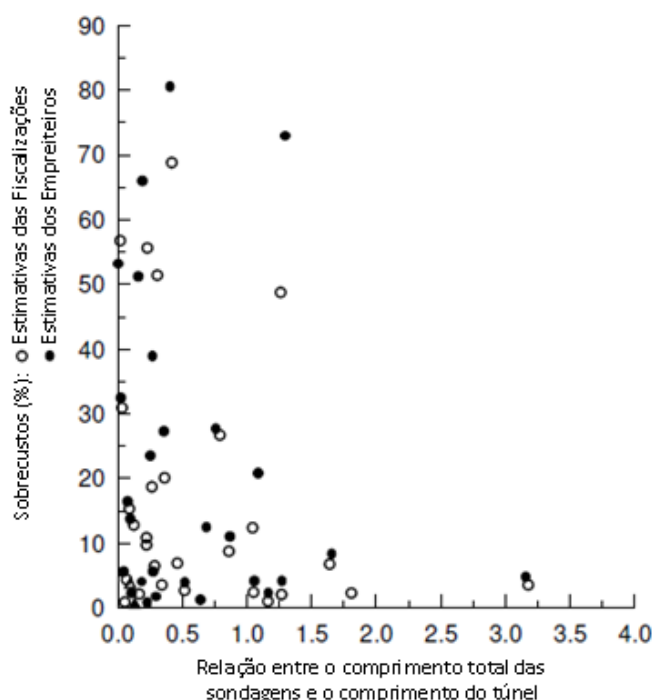
Para Neto & Kochen (2000), a maioria dos acidentes geológicos são causados pelo não reconhecimento antecipado de situações hidrogeológicas e/ou geotécnicas desfavoráveis. Relativamente aos aspectos na fase de projecto este ponto é apoiado pelas seguintes observações relativas à insuficiência dos estudos geológicos (*op. cit.*):

- ✓ O estudo é dificultado pelas complexidades geológicas e pelo recobrimento do túnel;



- ✓ O Dono de Obra impõe um limite no orçamento para os estudos geotécnicos, sem avaliar o potencial de eventuais riscos geotécnicos residuais;
- ✓ O plano de prospecção é estabelecido, independentemente do método de escavação a ser aplicado na construção do túnel;
- ✓ O plano de prospecção é geralmente executado numa única etapa; no entanto, uma prospecção com mais etapas seria mais informativa.

O problema básico enfrentado por um Projectista na tentativa de prever os riscos geotécnicos na construção de um túnel reside na quantidade de informações que podem ser obtidas a partir do programa de prospecção e ensaios da zona (Hoek & Palmeiri, 1998). O gráfico da Figura 3.10 elaborado com base em dados recolhidos pelo *United States National Committee on Tunneling Technology* (USNC/TT), após entrevistas a Donos de Obra, Equipas de Fiscalização e Empreiteiros que intervieram em 84 túneis (Hoek & Palmeiri, *op. cit.*), demonstra a importância da realização da prospecção geotécnica por sondagens face ao acréscimo nos custos contratuais da obra decorrentes de imprevistos geotécnicos.



**Figura 3.10. Variação do custo da obra em função da relação comprimento total de sondagens e comprimento do túnel (Hoek & Palmeiri, 1998, adaptado).**

Uma questão que frequentemente se coloca refere-se à quantidade de trabalhos de prospecção que, admitindo que não havia limitação de recursos, poderia ser considerada suficiente. A resposta a esta questão é muito dependente da natureza da obra e das condições do local. Contudo, existem já alguns valores de referência que podem ser usados

por Donos de Obra e Projectistas. Segundo Zhou & Cai (2007) a Figura 3.10 parece sugerir que a partir da relação 1,5, a variação dos custos do contrato, relativo às condições locais, pode ser mantida em valores iguais ou inferiores a 10%. Esta relação pode ser adequada para túneis de grande extensão. Ao invés, para instalações de armazenamento subterrâneo, túneis de pequeno comprimento e cavernas, em que as condições geológico-geotécnicas serão, em princípio, menos heterogéneas, esta relação poderá provavelmente ser reduzida (Zhou & Cai, *op. cit.*).

A Figura 3.10 sugere ainda que a realização de uma quantidade de sondagens insuficiente, poderá, em alguns casos, conduzir a um acréscimo significativo nos custos da obra. Este acréscimo está claramente associado com as dificuldades que surgem em resultado de condições geológicas imprevistas. Os mesmos autores (*ib.*) referem que estas conclusões são particularmente verdadeiras para túneis de grande extensão em terreno montanhoso, onde geralmente não é, nem fisicamente, nem economicamente viável a execução de um número suficiente de sondagens ou a escavação de um número suficiente de galerias, para estudar todas as unidades litológicas ao longo do alinhamento.

Além da necessidade de interpolar condições geológicas entre furos muito espaçados e/ou um número muito exíguo de galerias, existe ainda o problema de estimar os parâmetros geotécnicos para as condições geológicas resultantes dessa interpolação. O resultado é uma imagem muito vaga dos problemas de construção e dos custos resultantes que estarão associados com a escavação do túnel. A Figura 3.11 elucida bem este importante aspecto, onde se observa que existem algumas discrepâncias entre as classes de terreno avançadas na fase de estudo prévio e as que realmente ocorrem na fase de construção.

Fase	Classificação do terreno				
Estudo prévio	D I			C I	
Prospecção a partir da frente de escavação	D II	D I	D II	C II	
Construção	D II	D I	C II		D I C II
Estação	No. 324	No. 330	No. 340	No. 350	No. 357+10

Figura 3.11. Contraste da classificação do terreno entre a fase de estudo prévio e a fase de construção de um túnel (Ikuma, 2008, adaptado).

Segundo Azevedo (2008), para atingir os objectivos estabelecidos numa campanha de prospecção e caracterização de maciços, sejam eles terrosos ou rochosos, deve-se definir da forma mais exacta possível todos os factores de natureza geológica, geotécnica, hidráulica e geomecânica do maciço que possam interferir no desempenho técnico e económico da obra; é ainda necessário delimitar as diferentes unidades lito-estruturais presentes e a relação geológico-estrutural entre as mesmas, caracterizar a relação hidrogeológica entre as unidades discriminadas, obter parâmetros de natureza geotécnica dos maciços e das descontinuidades, seleccionar e executar os ensaios de laboratório e *in situ* e definir o valor dos parâmetros mecânicos e hidráulicos a ser utilizados no projecto, entre outros. Em suma, definir e caracterizar todos os condicionamentos que podem interferir na estabilidade da obra. A descrição do terreno é, deste modo, necessária para a elaboração de um modelo geológico que seja suficiente para a preparação do modelo geotécnico, para a avaliação do terreno, a sua subdivisão em diferentes unidades geológicas ou zonas homogéneas, e para o reconhecimento e avaliação dos potenciais cenários de risco.

Diversas técnicas e métodos de prospecção são frequentemente apresentados como solução para minimizar os riscos. No entanto, as metodologias não traduzem o carácter dinâmico dos trabalhos e não alertam para o problema das incertezas, de diferentes índoles, produto das diversas actividades levadas a efeito durante o transcorrer do processo, onde todas as fases da obra são guiadas fortemente pela experiência e julgamento profissional dos técnicos responsáveis pela condução dos trabalhos. É importante referir que determinadas condicionantes geológicas não são, ou não podem ser, identificadas e caracterizadas pelos métodos e técnicas mais usuais de prospecção. É o caso de algumas estruturas (estreitas bandas de cisalhamento e/ou de falha), diques, andamento do substrato, cavidades cársticas, etc., que para a sua determinação, necessitam de métodos de prospecção específicos e/ou da conjugação de diferentes métodos. Quanto mais cuidadosos e criteriosos forem os trabalhos de prospecção, menor a probabilidade de serem encontradas surpresas sobre condicionantes geológicos. No entanto, a execução de mais e melhores estudos geológico-geotécnicos não podem, por si só, resolver adequadamente o problema, uma vez que as informações nunca serão completas. Existirão sempre incertezas associadas aos dados obtidos, às interpretações efectuadas, aos parâmetros e propriedades consideradas, etc.

A avaliação da suficiência e, de certa forma, da qualidade dos estudos em obras subterrâneas tem sido executada analisando-se basicamente dois parâmetros: o comprimento de sondagens mecânicas executadas em relação ao comprimento total do túnel e o custo dos estudos geológico-geotécnicos em relação ao custo da obra. O USNC/TT (1984 *in* Azevedo, 2008) recomenda que o valor dispendido para campanhas de prospecção deve situar-se em cerca de 3% do custo do empreendimento e estabelece como adequado um comprimento total de sondagens mecânicas equivalente a 1,5 vezes o comprimento do túnel. Por sua vez, como termo de comparação, na Noruega o orçamento recomendado para as campanhas de prospecção situa-se na faixa de 2-10% do custo de escavação para túneis rodoviários e entre 5 a 15% para os túneis submarinos, além de 2-5% para realização de sondagens a partir da frente escavação, durante a construção (Zhou & Cai, 2007). O valor real dependerá do grau de dificuldade do projecto e das exigências da estrutura.

De uma maneira geral, o meio técnico reconhece como válidas estas orientações. Não há critérios formalmente estabelecidos para o desenvolvimento de estudos orientados exclusivamente pelo contexto geológico. Há apenas orientações vagas, sugerindo alteração nestes critérios em função da complexidade geológica e/ou do projecto. Por exemplo, em relação à profundidade, as sondagens devem atingir no mínimo um diâmetro abaixo da soleira do túnel, mas a experiência mostra que em alguns casos isso pode ser insuficiente.

Segundo Hoek & Palmeiri (1998) deve ser evitado a todo custo uma abordagem do género livro de receitas, *e.g.*, a “exigência” de uma sondagem a cada x metros. Admita-se, por exemplo, um túnel de 25km de extensão, escavado num maciço rochoso competente, sob uma montanha, com uma cobertura de terreno média de 300m. Admita-se ainda que, com base na experiência local, seja expectável, a cada 500m a presença de uma falha ou de uma área de contacto, mais frágil, entre diferentes tipos de rochas. Uma campanha de prospecção razoável consistiria na execução de furos de sondagem a cada 250m para a caracterização da rocha intacta, falhas e zonas de contacto, totalizando 30000m de sondagens. O custo da mobilização do equipamento e execução das sondagens, bem como o tempo dispendido são proibitivos mas, mesmo com uma campanha de prospecção pormenorizada e extensiva, a eliminação completa do risco devido a condições geológico-geotécnicas inesperadas não é possível (Hoek & Palmeiri, 1998 *in* Barbosa, 2008).

### 3.3.2.2 Durante a obra

Em Geologia de Engenharia, reduzir incertezas através da obtenção de mais informações, significa o desenvolvimento de novos estudos, ou de prospecções complementares, que possam conduzir a uma melhor definição das propriedades e dos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço. Limitar o impacto das incertezas no desempenho técnico-económico da obra, implica a necessidade de actuar sobre as consequências decorrentes da materialização dos processos geradores de risco, *i.e.*, dos processos associados à construção da obra ou relativos à estabilidade do maciço.

Como já referido, para Neto & Kochen (2000), a maioria dos acidentes geológicos são causados pelo não reconhecimento antecipado de situações hidrogeológicas e/ou geotécnicas desfavoráveis. Na fase de construção, este ponto é apoiado pelas seguintes observações relativas à insuficiência dos estudos geológicos (*op. cit.*):

- ✓ A cartografia geológico-geotécnica da frente de escavação e paredes do túnel durante o trabalho de construção é frequentemente escassa e os resultados nem sempre são interpretados de forma correcta e rápida;
- ✓ O Empreiteiro tende a limitar os estudos durante a execução da obra, especialmente quando o trabalho de escavação tem de ser interrompido para os efectuar;
- ✓ A tarefa do Empreiteiro é produzir, escavando tão rapidamente quanto possível; para o efeito, o Empreiteiro está pronto a correr riscos, e isto geralmente conduz a uma subestimação dos aspectos de segurança da situação geotécnica real;
- ✓ Igualmente, o interesse do Dono de obra é concluir o trabalho tão rapidamente quanto possível o que, implicitamente, permite ao Empreiteiro correr riscos, reservando-se o direito de discutir sobre quem terá de pagar pelas consequências.

É extremamente difícil definir, *a priori*, as técnicas e os métodos de prospecção mais adequados a utilizar numa determinada obra, assim como avaliar os resultados dos estudos já realizados. Da mesma forma, é extremamente difícil avaliar a necessidade de novas campanhas de prospecção uma vez que, em rigor, não há garantia de que todas as condições geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas e geomecânicas do maciço venham a ser perfeitamente diagnosticadas e caracterizadas, independentemente dos procedimentos de prospecção utilizados. Contudo, uma avaliação cuidadosa da prospecção já realizada é fundamental, visto que, no contexto da estratégia de decisão, a obtenção de informações

que possam conduzir ao detalhar das propriedades e parâmetros do maciço e dos condicionamentos geológicos, significa a redução de incertezas e, portanto, de riscos.

Nas áreas onde as análises indicarem estudos inadequados, pode ser conveniente o desenvolvimento de novas campanhas, ou seja de prospecções complementares. Caso seja julgada necessária a sua execução, estas podem ser conduzidas de diversas formas: a partir da superfície do terreno, ou a partir da frente de avanço, durante a construção do túnel.

A execução de prospecção na frente é uma prática comum em alguns países da Europa, devido a condições geomorfológicas específicas. Por exemplo, na Noruega, estes estudos superam de forma considerável o total de sondagens executadas a partir da superfície (Aagaard & Blindheim, 1999 *in* Azevedo, 2008). Caso os estudos sejam conduzidos a partir da superfície natural do terreno, é difícil estabelecer se os resultados destes irão, efectivamente, minimizar as incertezas relativas aos condicionantes geológicos do projecto. Por outro lado, se a prospecção for conduzida a partir da frente de escavação, a decisão relativa ao processo construtivo já foi tomada com base apenas no conhecimento geológico existente. Estes procedimentos, neste caso, visam apenas a definição de eventuais tratamentos a serem aplicados, caso sejam detectadas condições desfavoráveis para o avanço dos trabalhos.

As condições geológicas sob as quais a escavação do túnel se vai desenvolver, favoráveis ou não, determinam em grande parte, o desempenho do método construtivo, assim como a magnitude das consequências advindas da materialização de algum processo gerador de risco. Parker (2004) com base nas recomendações da USNC/TT refere algumas orientações para a determinação do esforço adicional que é necessário em grandes ou complexos projectos geotécnicos:

- ✓ Desenvolver programas faseados para preencher as necessidades reais;
- ✓ Planear a utilização de técnicas não-tradicionais, como a geofísica, poços, galerias, túneis piloto, ensaios de bombagem, etc., conforme o caso, desde que utilizadas para aumentar significativamente a base de dados e reduzir as incertezas;
- ✓ Para todas as fases da obra, destinar um orçamento e reserva financeira entre 1/2 e 3/4 do valor que consta nas recomendações do USNC/TT (1984) (*i.e.*, o comprimento de furação varia de 0,75 a 1,2 vezes o comprimento do túnel e os custos geotécnicos variam de 1,5 a 2,25% do custo da construção);

- ✓ Reservar um orçamento de contingência no valor de 3,0% do custo da construção;
- ✓ Prever sondagens de emergência e outras técnicas de prospecção facilmente financiadas e prontas a ser aprovadas em tempo útil. Idealmente, sondagens ou ensaios adicionais poderão ser aprovados quando os equipamentos ainda estão no local, economizando no seu custo de remobilização.

Existem actualmente muitas técnicas eficazes de prospecção, como, por exemplo, os modernos métodos geofísicos que têm vindo a aumentar em número e qualidade, permitindo interpretações mais precisas e intuitivas. Está além do âmbito deste trabalho discuti-los em detalhe.

A melhor informação sobre as condições do subsolo é obtida a partir de valas e túneis piloto. No entanto, as valas são habitualmente pouco profundas, destinando-se maioritariamente ao estudo dos emboquilhamentos, e os túneis piloto, para além de dispendiosos, têm em regra, comprimentos limitados, em comparação com o comprimento total do túnel, pelo que apenas uma quantidade limitada de informações podem ser obtidas a partir deles. Em alguns casos excepcionais, foram construídos túneis piloto numa parte ou na totalidade do comprimento do túnel principal, fornecendo informações relevantes, bem como a oportunidade de proceder à drenagem e reforço da massa rochosa na frente. Quando é construído um túnel piloto, a possibilidade de surgirem problemas de construção no túnel principal, devidos a condições geológicas imprevistas, diminui drasticamente (Hoek & Palmeiri, 1998). Em casos particularmente difíceis, o elevado custo de execução de um túnel piloto pode ser justificado com base nessas dificuldades. Zhou & Cai (2007) mencionam o caso de um túnel piloto que foi executado com os seguintes objectivos:

- ✓ Obter uma boa avaliação das condições geológicas e da qualidade do maciço rochoso, bem como da eficácia do método de escavação e de sustimento;
- ✓ Obter dados sobre custos e preços unitários;
- ✓ Verificar os pressupostos da concepção e execução do túnel, através da aplicação de instrumentação;
- ✓ Obter *feedback* para a modificação do projecto e das especificações técnicas.

A maioria das sondagens são executadas em furos verticais ou acentuadamente inclinados mas, em alguns casos, a perfuração horizontal tem sido utilizada com muito sucesso. Esta é particularmente útil no estudo de locais onde o acesso é limitado ao longo do alinhamento

do túnel. Furos horizontais, de várias centenas de metros, foram executados em algumas obras. No que respeita aos métodos geofísicos, alguns fabricantes de tuneladoras já começam a instalar equipamentos de sísmica nas cabeças de corte destas máquinas, a fim de proporcionar uma antevisão das características do maciço a partir da frente.

A estes métodos devem acrescentar-se as técnicas de reconhecimento da frente de escavação:

- ✓ Observação da frente a desmontar por parte de técnicos especializados;
- ✓ Determinação dos parâmetros de furação (velocidade, força, etc.);
- ✓ Realização de sondagens na frente de desmonte (sondagens em avanço), com recuperação do testemunho;
- ✓ Aplicação do Martelo de Schmidt, útil na caracterização expedita do maciço;
- ✓ Disponibilidade de equipamentos laboratoriais simples em obra.

A cartografia geotécnica faz parte das fontes de informação geotécnica complementar. Esta cartografia caracteriza as frentes de desmonte, em termos de litologia, diaclasamento, caudais emergentes, grau de alteração, acidentes tectónicos, etc., contribuindo decisivamente para a optimização das actividades de escavação e sustimento e influenciando, igualmente, os sistemas de monitorização a implantar. O destaque desta actividade recai na identificação das mudanças significativas da geologia e fracturação da frente de escavação, influenciando a classificação da frente em termos de zonamento e para a detecção de acidentes tectónicos passíveis de motivar uma intervenção excepcional dos métodos de escavação, suporte e monitorização (Bastos, 1998).

Outras fontes de informação geotécnica complementar são o registo de toda a informação sobre a sequência de escavação, de colocação do suporte e das dificuldades e problemas encontrados, passando pela execução de ensaios *in situ* e de laboratório com o objectivo de caracterizar melhor as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade do maciço (Amaral, 2006).

Em jeito de conclusão sublinha-se que “Sem prospecção, o terreno é um perigo”, (Telford, 2003 *in* Chapman, 2008). Estudos para obras subterrâneas devem ser desenvolvidos de modo a atenderem os diferentes objectivos e complexidade dos projectos, às necessidades do método construtivo e ainda às dimensões da cavidade a ser aberta. No entanto, os estudos para determinar aspectos e detalhes específicos de cada obra não se devem



sobrepôr àqueles para determinação dos condicionantes geológicos que possam interferir na estabilidade da escavação e que, em última análise, definem o sucesso ou o insucesso da obra. Ainda assim, é essencial notar que nem todos os problemas podem ser antecipados através de prospecção adicional. Existe uma vasta bibliografia sobre técnicas e métodos mais utilizados na prospecção e caracterização geotécnica para a construção de túneis, recomendando-se, entre as variadas referências disponíveis, a consulta de TGN24 (2009), um documento actualizado e que resume de forma clara esta temática.

### **3.3.3 Selecção do método construtivo**

#### **3.3.3.1 Impacte na obra**

A estratégia adoptada para redução do risco passa pela redução das incertezas através da execução de prospecções complementares e/ou pela escolha de um método construtivo, cuja aplicação possa evitar a materialização de processos geradores de risco limitando, desta forma, o impacto das incertezas no desempenho técnico-económico da obra. A escolha correcta do método construtivo para a obra subterrânea está entre as primeiras e mais importantes medidas de redução/mitigação de risco ou, por outras palavras, é a resposta primária aos principais riscos identificados (Kochen, 2009).

A selecção do método construtivo é uma decisão a partir da qual é possível estabelecer todos os demais aspectos relativos ao projecto e construção do túnel. Os métodos de escavação subterrânea podem ser, genericamente, divididos em dois grandes grupos (Azevedo, 2008): as escavações com explosivos e as escavações mecânicas com tuneladoras, para abertura em secção plena, e roçadoras, retroescavadoras ou martelos pneumáticos ou hidráulicos, para abertura parcial faseada. As escavações subterrâneas com explosivos são amplamente utilizadas e, dependendo do tipo de maciço, da extensão do túnel ou das dimensões da cavidade, podem ser mais viáveis em termos técnicos e económicos. Os métodos mecanizados de escavação de túneis tiveram grandes desenvolvimentos, devidos aos avanços significativos na tecnologia dos equipamentos levando a que, actualmente, estes métodos possam competir técnica e economicamente com o dos explosivos. Devido às necessidades e uso crescentes, os métodos mais modernos incorporam elementos para protecção de determinadas secções da máquina, são dotados de recursos que permitem o reconhecimento prévio do maciço na frente da escavação e de sistemas para o tratamento

e/ou aplicação do sustimento, caso ocorram alterações nas condições geológicas. Ainda assim os desastres continuam a existir.

A causa do colapso na frente de escavação mais frequentemente citada é a condição de terreno instável. Obviamente, quando um método de construção apropriado é seleccionado, a frente do túnel dificilmente entra em colapso. Portanto, normalmente a causa daquele colapso não é devida ao terreno, mas ao uso de um método construtivo inadequado às condições de terreno existentes (Neto & Kochen, 2000). Este tipo de erro ocorre quando os responsáveis pelo projecto, construção e supervisão (*op. cit.*):

- ✓ Não previram deficiências no método construtivo utilizado, para as condições do terreno efectivamente encontradas;
- ✓ Não previram mudanças nas condições do terreno e, portanto, não alteraram o método construtivo em tempo útil;
- ✓ Falharam ao identificar a natureza do terreno encontrado e, portanto, em prever o comportamento do mesmo.

No Quadro 3.15 listam-se alguns casos de insucesso em túneis recentemente realizados com o método de escavação mecanizada TBM, devido à escolha incorrecta da técnica de escavação, descrevem-se ainda as condições geológicas, perigos geotécnicos e a técnica de escavação que seria mais apropriada com base em novas informações.

**Quadro 3.15. Túneis recentemente construídos com técnicas de escavação inadequadas (Khademi, 2006 in Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).**

Túnel	Comprimento (km)	Diâmetro (m)	Condições geológicas	Perigos geotécnicos	Técnica seleccionada	Técnica apropriada
Gavoshan (Irão)	20	5,5	Xistos argilosos, dioritos, gabros	Instabilidade na frente e paredes do túnel, zona de falha	TBM sem escudo	TBM com escudo
Penstock (Suíça)	20	4,4	Micaxistos e gnaisses muito esmagados	Afluxo de água, terreno erodível na frente	TBM telescópica	EPB com escudo
Ilse Wagrain	5,56	3,1	Filitos	Encravamento da TBM	TBM sem escudo	Explosivos
Idaha	-	-	Quartzitos muito fracturados	Rocha dura e abrasiva	TBM sem escudo	Explosivos
Highway A1 (Itália)	8,5	3,9	Xistos e grauvaques	Paredes instáveis com queda de blocos	TBM sem escudo	TBM com escudo
Halland (Suécia)	-	9,1	Gnaisses intercalados com anfíbolitos	-	TBM com escudo simples	TBM sem escudo

Apresenta-se em seguida um exemplo de aplicação da selecção apropriada do método construtivo, num túnel.

### 3.3.3.2 Caso prático de aplicação

Shahriar *et al.* (2008) referem-se à selecção do método de escavação mais adequado para a construção do túnel hidráulico *Nosoud*, no Irão, que teve por base uma análise por árvore de decisão (*Decision Tree Analysis*). Esta análise é uma técnica eficiente de entre outras semelhantes, utilizada para analisar e contribuir para adoptar a melhor decisão, avançando com uma ou várias alternativas baseadas nas informações disponíveis e em critérios específicos. Através da análise por árvore de decisão, as incertezas são apresentadas num formato estruturado.

Para este túnel o método escolhido foi a escavação mecânica com tuneladoras. De acordo com o tipo de maciço, as opções seriam: TBM para maciços rochosos duros e TBM para maciços terrosos brandos. As TBM para maciços rochosos dividem-se em: tuneladoras sem escudo, tuneladoras de escudo simples e tuneladoras de escudo duplo. Com base na árvore de decisão, a TBM mais adequada é aquela que tem o nível de risco mínimo, antes ou após a aplicação de medidas mitigadoras.

Em primeiro lugar, com base em critérios tais como a geometria do túnel, as restrições ambientais, as restrições de projecto (custo e tempo de construção) e os parâmetros geomecânicos e geotécnicos, é seleccionado um dos três métodos de escavação (explosivos, NATM e TBM). Verificou-se que a TBM era a alternativa mais apropriada. Entre os vários tipos de tuneladoras a mais adequada foi seleccionada com base nas condições do terreno (maciço terroso brando ou rochoso duro), ao longo do alinhamento do túnel. De um modo geral, as máquinas mais confiáveis são as mais simples, pois têm menor quantidade de equipamentos que poderão sofrer danos. Assim, numa árvore de decisão (Figura 3.12) deve-se começar por escolher a rota 1, TBM sem escudo; se esta máquina não for adequada, então passa-se para a rota 2, TBM com escudo simples; se ainda assim esta máquina não for a adequada, passa-se para a rota 3, TBM com escudo duplo.

Como se demonstra na Figura 3.12, quando uma TBM atinge um perigo geotécnico podem aparecer dois estados, a condição é tal que a máquina consegue atravessá-lo, ou não. Se a

máquina consegue passá-lo (Sim) avança-se para a avaliação de outro perigo. Mas, se a máquina não consegue passá-lo ou atravessa-o, mas com grandes dificuldades (Não), o nível de risco não é aceitável, devendo-se aplicar medidas de mitigação. Depois da aplicação dessas medidas podem aparecer dois estados: nível de risco aceitável ou nível de risco inaceitável. Se o nível de risco for aceitável (Sim), avança-se para outro perigo, mas se for inaceitável (Não), então, deve-se alterar a técnica/método de escavação.

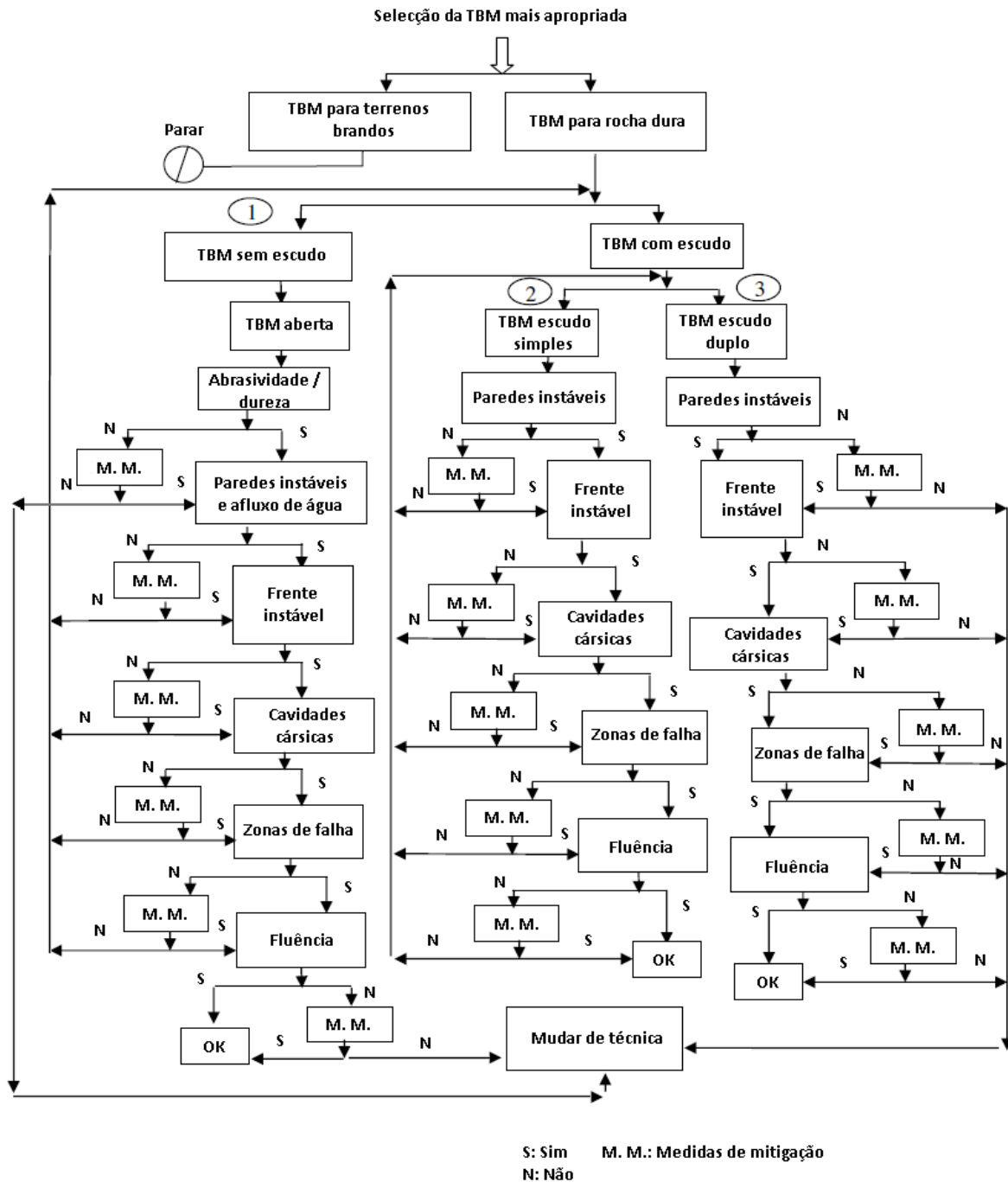


Figura 3.12. Árvore de decisão para a selecção da TBM mais apropriada (Khademi *et al.*, 2006 in Shahriar *et al.*, 2008, adaptado).

A selecção do método de construção do túnel *Nosoud* teve ainda em conta a taxa mensal de escavação pretendida, estipulada na ordem de 400 m/mês. Segundo o autor, é impossível a realização desta taxa pelo método de escavação convencional. Por outro lado, este túnel é de transferência de água, sendo preferível a aplicação de uma TBM com uma forma circular. Finalmente, após estudos técnicos e de viabilidade, foi seleccionado o método de escavação mecânica com tuneladora, devido às suas elevadas taxas de avanço em comparação com os métodos de escavação convencionais. Como cerca de 85% do alinhamento do túnel atravessa camadas de rocha dura, a selecção de TBM para maciço rochoso foi considerada a solução mais adequada. Com base na avaliação de risco geotécnico, tanto as tuneladoras de escudo simples, como a de escudo duplo podiam ser utilizadas. No entanto, de acordo com os limites de prazo da construção, foi proposta a utilização de uma tuneladora com escudo duplo, devido a ter um funcionamento contínuo e uma maior flexibilidade, ao encontrar terrenos com condições desfavoráveis. O desempenho da máquina durante o período de construção verificou o sucesso da decisão adoptada (Shahriar *et al.*, 2008).

O exemplo exposto demonstra bem a importância que a selecção do método construtivo mais apropriado desempenha no sucesso da obra, em termos de segurança, tempo e do ponto de vista económico. Por outro lado, a incerteza nos parâmetros geológicos e geotécnicos é inevitável, por não ser possível conhecer todos os aspectos do perfil geológico durante a prospecção do local, contudo pode ser minimizada através da realização de prospecção complementar na fase de construção. Daqui se conclui que, tanto o método construtivo como a prospecção geotécnica e a respectiva caracterização do maciço, poderão ter um papel bastante importante na redução do risco.



## 4 ASPECTOS CONTRATUAIS

Neste capítulo, além de um enquadramento geral, apresentam-se vários aspectos contratuais, incluindo tipos de contrato mais comuns para túneis, o modo como a abordagem do risco geotécnico é contemplado nesses contratos, a responsabilidade e funções principais das partes intervenientes na gestão do risco, a importância e os benefícios da alocação/partilha do risco entre Dono de Obra e Empreiteiro e, por último, a criação de um RGR, visando o estabelecimento de uma compreensão contratual das condições geotécnicas, através da definição de valores de referência.

### 4.1 ENQUADRAMENTO

Acidentes, litígios e reclamações são comuns em grandes obras de construção subterrânea. As principais causas dos conflitos estão geralmente relacionadas com a inadequada compreensão das condições geológico-geotécnicas previstas para o local e da falta de condições para efectuar uma partilha de riscos geotécnicos equitativa entre o Dono de Obra e o Empreiteiro. Tais litígios podem ser minimizados, através de uma justa e adequada partilha de riscos entre os intervenientes.

Desde modo, é muito importante em túneis aplicar modelos contratuais, diferentes do de outros tipos de construção. Com a possibilidade de encontrar novas condições, o contrato deve ser baseado num ajustamento prévio entre os vários intervenientes no processo, o que auxilia na resposta às novas condições detectadas, mesmo que as disposições pertinentes para todas as consequências possíveis não possam ser incluídas imediatamente, no momento da adjudicação. Para Ehrbar (2008), o Dono de Obra deve prescrever o método de escavação, apenas se houver fortes razões para fazê-lo com base nas restrições do projecto. A responsabilidade da escolha do método de escavação deve ser deixada para o Empreiteiro, com base na descrição do Dono de Obra das condições do maciço e dos limites estabelecidos pelo Projectista. Deste modo, existe a necessidade de uma forma de contratação criativa, progressiva e justa na construção subterrânea e, especialmente, em túneis (ITA, 2009).

O nível de partilha de riscos é um factor importante para decidir o tipo de contratos a serem acordados. Outras questões que influenciam o tipo de contratos incluem a dimensão e a complexidade do projecto, a definição do seu âmbito, bem como a identificação das

restrições impostas. Uma maior informação sobre o que deve ser feito na fase de negociação do contrato de construção pode ser obtida através da consulta do *Code of practice for risk management of tunnel Works* (ITIG, 2006).

Na elaboração do contrato deve ser incluída uma descrição do sistema de gestão do risco a implementar. Entre todas as partes devem existir negociações no sentido de prever soluções técnicas alternativas para os riscos identificados. Nesta fase, devem ainda ser caracterizados os riscos não previstos ou que venham a requer atenções especiais. Caso estes se venham a materializar, devem ser previstas, no contrato, cláusulas para a implementação de medidas mitigadoras adicionais. A *American Society of Civil Engineers* (Essex, 1997) recomenda as seguintes medidas para redução de riscos geotécnicos:

- ✓ Destinar um orçamento adequado para os estudos geológico-geotécnicos do subsolo;
- ✓ Recorrer a especialistas qualificados para estudar, avaliar potenciais riscos, preparar projectos e especificações, bem como um RGR consistente da análise de riscos;
- ✓ Alocar recursos financeiros e tempo suficiente para preparar um RGR claro e consistente com outros documentos de projecto;
- ✓ Desenvolver as disposições de pagamento de preço unitário que pode ser ajustado para as condições encontradas;
- ✓ Analisar e discutir os valores de referência com os proponentes antes da apresentação das propostas;
- ✓ Manter um fundo de reserva adequado, com um valor ajustado aos riscos previstos no projecto.

## 4.2 CONTRATOS E RESPONSABILIDADE PELO RISCO GEOTÉCNICO

O tipo de contrato é uma ferramenta que pode ser usada para lidar com o risco do projecto que, no caso das obras subterrâneas, é principalmente de índole geotécnica. No entanto, o risco geotécnico permanece no projecto, seja ele suportado pelo Dono de Obra, Empreiteiro, Projectista ou Seguradora.

Segundo Munfah (2007), na construção subterrânea têm sido utilizados principalmente dois tipos de contrato, com vários níveis de sucesso. São eles:

- ✓ *Design-Bid-Build* (Concepção – Concurso – Construção);
- ✓ *Design-Build* (Concepção - Construção).



As modalidades contratuais destes dois métodos variam amplamente. A mais comum é a abordagem designada de preço fixo, em que o Empreiteiro é obrigado a indicar uma proposta de preço global, fixo, que corresponde à liquidação de todo o conjunto de serviços de construção previstos no contrato, independentemente das quantidades que realmente venham a ser necessárias. Contudo, há uma outra modalidade, designada de preços unitários, mais adequada aos métodos construtivos de tipo convencional (*e.g.*, escavação mecânica com escavadora, por explosivos, etc.), uma vez que preconiza um conjunto de preços, unitários, para cada tipo de serviço parcial a desenvolver pelo Empreiteiro e a que corresponde uma liquidação segundo a quantidade efectivamente executada.

A forma de contrato conhecido como *Design-Bid-Build* é tradicionalmente um preço global fixo (*op. cit.*). Geralmente, o Dono de Obra contrata o Projectista para realizar a totalidade do projecto e apresentá-lo na documentação do concurso. Neste tipo de contrato, presume-se que o Dono de Obra fica com um preço fixo e o Empreiteiro terá o benefício do lucro e aceitará toda a responsabilidade pelas possíveis perdas. O Empreiteiro assume todo o risco e, portanto, acrescenta uma elevada contingência à sua proposta. Este tipo de contrato é fácil e simples. Neles são definidas, claramente, as funções e responsabilidades do Empreiteiro e do Dono de Obra. Este último fornece o projecto e obtém todas as aprovações, enquanto o Empreiteiro executa o trabalho com os meios e métodos que entender; prevê-se, então, um forte controlo por parte do Dono de Obra e, como resultado disso, é alcançada uma maior qualidade embora, muitas vezes, o custo seja maior. Nesta forma de contrato, o Dono de Obra deve ter uma identificação completa dos problemas geotécnicos, antes de lhe ser apresentada qualquer proposta; de outro modo serão considerados custos adicionais. Nesta forma de contrato as qualificações do Empreiteiro são estabelecidas após a abertura das propostas, o que pode levar à selecção de Empreiteiros inexperientes ou incompetentes para executar a construção de túneis.

No passado, a licitação e adjudicação dos serviços de concepção e de construção realizavam-se em separado (*Design-Bid-Build*). Actualmente existe uma tendência a uni-los em contratos denominados *Design-Build* e a adjudicá-los à empresa construtora (Munich Re Group, 2004). Nos últimos anos este tipo de contratos tem sido implementado em projectos de grandes dimensões. Para a proposta, o Dono de Obra realiza apenas um esboço das obras e deixa os detalhes nas mãos das empresas construtoras que participam na licitação. Estas,

por sua vez, realizam o projecto detalhado ou relegam essa tarefa a uma empresa externa de Projectistas. Assim, o Dono de Obra goza de vantagens nos custos, uma vez que economiza no planeamento dos serviços e pode, também, aproveitar os conhecimentos e a experiência prática das empresas de construção. Estas últimas, por sua vez, têm a vantagem da simplificação do planeamento e da execução das obras, pois não é necessário realizar complexos processos de aprovação e podem trabalhar no sentido de otimizar custos. Usando este tipo de contratos, é importante estabelecer medidas de gestão de riscos na construção de túneis. Estas podem incluir entre outras (Munfah, 2007):

- ✓ A pré-qualificação dos Empreiteiros;
- ✓ A divulgação completa de informações geotécnicas;
- ✓ A criação de um conselho de revisão de litígios;
- ✓ O estabelecimento de preços unitários e propostas para medidas de contingência;
- ✓ A criação de parcerias;
- ✓ O uso de cláusulas para as diferentes condições do terreno - *Differing Site Conditions* (DSC);
- ✓ A alocação/partilha do risco.

Num contrato de construção regulam-se todas as condições chave acordadas entre o Dono de Obra e o Empreiteiro encarregado de executar as obras. O mais usual é adoptar a forma de contrato vigente no país do projecto, ou um formato contratual reconhecido internacionalmente pela *International Federation of Consulting Engineers* (FIDIC), ou então um elaborado especificamente para o projecto em questão.

Em muitos países europeus, os modelos de investimento privado têm oferecido uma alternativa que merece ser levada em conta. Neste contexto, e para os túneis, surge um novo tipo de contrato designado de Construção – Exploração – Transferência ou *Build – Operate – Transfer* (BOT). Isto significa que um consórcio formado por diferentes entidades do sector privado se encarrega de garantir o financiamento. Nos projectos BOT a gestão do projecto é entregue, na maioria dos casos, a um Empreiteiro geral que assume a responsabilidade pela concepção, projecto, construção e exploração da obra durante o período de concessão até à sua entrega ao Dono de Obra. Podem, no entanto, optar-se por variantes, tais como, por exemplo, a que consiste na elaboração do projecto e do caderno de encargos pelo Dono de Obra, iniciando-se o BOT na fase de construção. Estes processos

carecem de um especial cuidado na fixação de cláusulas que permitam ao Dono de Obra, ou às entidades que o representem, “fiscalizar” o desenvolvimento da construção e da exploração e estabelecer condições que evitem a assumpção unilateral de encargos sempre que as condições de exploração não satisfaçam os objectivos do concessionário, assumindo praticamente todos os riscos pelos eventuais insucessos relativos do empreendimento.

Em Portugal, a situação dos contratos para obras geotécnicas tem vindo a melhorar ao longo dos anos. Nos contratos antigos e ainda nalguns actuais, o Empreiteiro, com apoio jurídico, tem conseguido, quase invariavelmente, vencer as disputas com o Dono de Obra sempre que se tenham verificado situações não previstas no projecto da obra. Por outro lado, nos novos contratos do tipo Concepção – Construção, o Dono de Obra faz com que fique estabelecido nos termos contratuais que, se as condições reais da obra forem diferentes das previstas, as respectivas consequências, positivas ou negativas, devem ser assumidas pelo Adjudicatário (*i.e.*, os “lucros” ou os encargos são atribuídos por inteiro à entidade Adjudicatária). Contudo, esta é uma cláusula com pouca validade jurídica, porque é muito proteccionista para o Dono de Obra, uma vez que o Adjudicatário pode encontrar algo muito diferente, especialmente para pior, do inicialmente previsto. Mais recentemente, assiste-se a uma evolução para o risco partilhado, entre o Dono de Obra e o Adjudicatário, e esta abordagem tem vindo a ganhar cada vez mais adeptos. A Figura 4.1 mostra a evolução contratual internacional, que se adapta ao caso português.

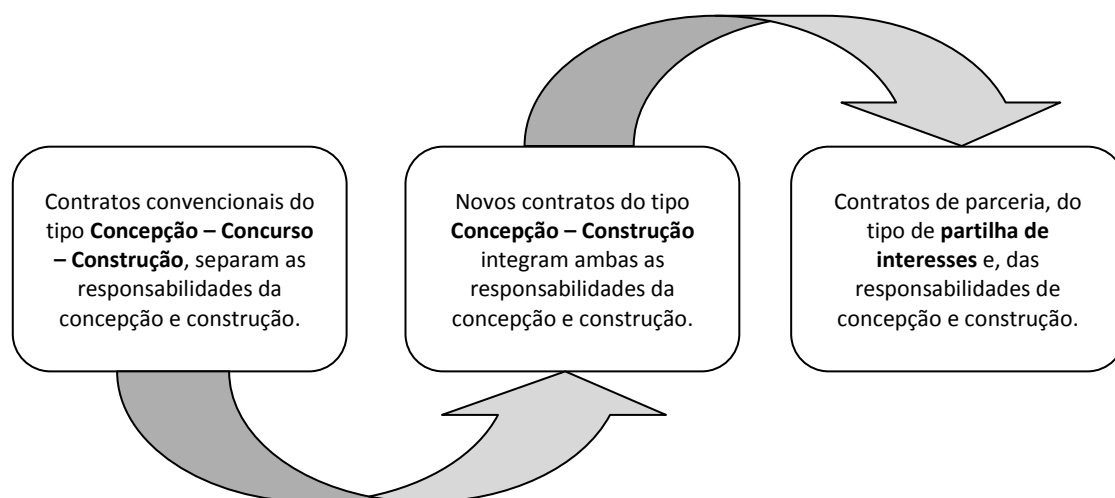


Figura 4.1. Evolução contratual em túneis (Staveren, 2006, adaptado).

Na actualidade, o risco é assumido pela empresa construtora, a qual é totalmente responsável por solucionar qualquer tipo de problemas imprevistos que surjam durante a execução das obras devido a condições geológicas imprevistas. Na maioria dos casos, para as solucionar são necessárias medidas construtivas (melhoramento do terreno, medidas de protecção adicionais, etc.), cujos custos não estão incluídos na proposta inicial, nem são compensados pelo Dono de Obra. A maioria das formas comumente adoptadas nos contratos de construção têm uma abordagem do tipo risco partilhado, para as condições do terreno em que o Dono de Obra congrega um conjunto de informações antes da adjudicação do contrato, torna-as disponíveis a todos os proponentes, e os adjudicatários assumem o risco de que as condições eram razoavelmente previsíveis com base nessas informações e também, implicitamente, no seu conhecimento e experiência. Seguidamente, o Dono de Obra, assume o risco das condições físicas (terreno), que não eram razoavelmente previsíveis por um Empreiteiro experiente no momento em que a sua proposta foi apresentada.

Esta é uma abordagem bem-intencionada para uma repartição equitativa dos riscos derivados das condições do terreno. No entanto, há uma série de áreas onde as divergências sobre a interpretação deste tipo de cláusula podem levar a longas e dispendiosas disputas. Exemplo disso é o facto de se fornecer aos Empreiteiros os resultados de apenas um pequeno número de furos de sondagem ou um conjunto de relatórios factuais e prestado pouco, ou nenhum, acesso a relatórios ou documentos na posse do Dono de Obra, que permitiriam a interpretação das condições do terreno e, presumivelmente, do material que formou a base da sua própria avaliação de riscos.

A gestão do risco específico para cada obra deve ser desenvolvida com a cooperação de todas as entidades envolvidas. Não apenas o Dono de Obra e o Empreiteiro, mas também o Projectista pode partilhar o risco, especialmente nos contratos de Concepção - Construção. Nesta circunstância é fundamental definir quais as principais funções das partes envolvidas na gestão do risco (Ameratunga, 2008; Grasso *et al.*, 2007):

a) Dono de Obra:

- ✓ Identificação dos métodos para lidar com os riscos;
- ✓ Aquisição de estudos de viabilidade, estudos preliminares, estudos de avaliação de risco e recomendações sobre a gestão de risco para o projecto;

b) Empreiteiro:

- ✓ Revisão dos riscos geotécnicos do projecto;
- ✓ Em colaboração com o Projectista, desenvolver métodos de construção, e seleccionar a instrumentação e sistemas de monitorização e planos de contingência, para o controlo dos riscos geotécnicos;
- ✓ Sempre que é adoptado o MO, deve-se promover um *feedback* de informação para os Projectistas validarem os pressupostos do projecto;

c) Projectista:

- ✓ Identificação e quantificação do perigo geotécnico;
- ✓ Desenvolver um RR, que contemple as acções de projecto utilizadas para quantificar o risco;
- ✓ Contribuir para a sugestão de novas ideias, inovações tecnológicas, com o objectivo de garantir a segurança e a melhoria da produção em obra em termos de avanço dos trabalhos em todos os tipos de contexto geológico;
- ✓ Validar as hipóteses de projecto durante a construção.

## 4.3 ALOCAÇÃO/PARTILHA DO RISCO GEOTÉCNICO

### 4.3.1 Relevância

A partilha do risco geotécnico entre o Dono de Obra e o Empreiteiro é primordial nos contratos de obras subterrâneas. Na maioria dos tipos de contrato internacionais para obras subterrâneas, os parâmetros geológicos e geotécnicos são essenciais apenas para a descrição do terreno. Ao invés disso, devia-se salientar a influência do terreno na produtividade, *i.e.*, a resistência do solo, o desgaste do equipamento de perfuração, as ocorrências a serem tratadas, tais como o afluxo excessivo de água ou as zonas de falha não previstas, bem como a quantidade de elementos de sustimento, tais como pregagens, malha sol, aduelas metálicas ou betão projectado, necessárias à garantia de condições de segurança, em especial nos locais próximos da frente do túnel. Existem várias aproximações alternativas de partilha de risco para as condições do terreno. A aproximação seleccionada terá um impacte real nos vários aspectos do desenvolvimento da obra, incluindo (Caldeira, 2005):

- ✓ No número de propostas recebidas;
- ✓ Na adopção de planos de medidas de contingência;

- ✓ Na capacidade de gerir, de antecipar e de resolver eficazmente conflitos, disputas e reclamações que surjam em consequência das condições efectivas do subsolo;
- ✓ Na garantia de financiamento, para além do custo inicial de adjudicação, de outros adicionais devidos às condições do terreno, que decorram do processo de construção.

Este último ponto, já está contemplado no Decreto-Lei n.º 278/2009 de 2 de Outubro, Código dos Contratos Públicos (CCP), nomeadamente no Artigo 370.º - Trabalhos a mais. O mesmo define-os como aqueles cuja espécie ou quantidade não esteja prevista no contrato e que se tenham tornado necessários à execução da obra, na sequência de uma circunstância imprevista, e não possam ser técnica ou economicamente separáveis do objecto do contrato sem inconvenientes graves para o Dono de Obra ou, embora separáveis, sejam estritamente necessários à conclusão da mesma.

A execução de trabalhos a mais só pode ocorrer quando: o preço atribuído aos trabalhos a mais, somado ao preço de anteriores trabalhos a mais e deduzido do preço de quaisquer trabalhos a menos, não exceder 5 % do preço contratual; e o somatório do preço atribuído aos trabalhos a mais com o preço de anteriores trabalhos a mais e de outros anteriores de suprimento de erros e omissões não exceder 50 % do preço contratual.

Aquele limite previsto de 5% é elevado para 25 %, sempre que estejam em causa obras cuja execução seja afectada por condicionalismos naturais com especiais características de imprevisibilidade, nomeadamente as obras complexas do ponto de vista geotécnico, como é a construção de túneis.

O CCP constitui uma revolução no sector da construção em Portugal, ao clarificar a responsabilidade dos vários intervenientes na obra; por outro lado, permite uma maior liberdade contratual entre as partes (Flor & Roxo, 2010). Noutros casos, os riscos são atribuídos e assumidos de uma forma consciente, quando o Dono de Obra (Caldeira, 2005):

- ✓ Não autoriza a realização de uma prospecção geotécnica prévia à construção;
- ✓ Não disponibiliza ao Empreiteiro informação pertinente acerca das condições do local (avaliadas e antecipadas);
- ✓ Escolhe não ter em conta qualquer contingência para diferentes condições no local, encontradas durante a construção;

Ou quando um Empreiteiro (*op. cit.*):

- ✓ Elabora uma proposta sem conduzir qualquer inspecção ao local;
- ✓ Age ignorando a informação fornecida ou disponível para as condições do local; ou
- ✓ Assina um contrato sem qualquer cláusula DSC e não tem em conta qualquer contingência para o risco das condições serem distintas das esperadas.

Quaisquer que sejam as circunstâncias, a atribuição e a assunção numa obra geotécnica de riscos muito elevados ou intoleráveis pelo Dono de Obra ou pelo Empreiteiro, têm uma relação directa com o aumento da probabilidade de ocorrências adversas, de exceder os custos e os prazos previstos, de disputas, de reclamações ou de uma eventual litigação. Como regra geral, quanto maior for o risco que o Dono de Obra estiver disposto a correr, menor será o custo inicial de construção. Inversamente, quanto menor for o risco assumido pelo Dono de Obra, maior será o custo inicial da construção, em resultado da adopção de atitudes, por parte dos Concorrentes, de propostas defensivas e dos custos de contingência associados. A posição óptima varia significativamente de um projecto para outro, dependendo do risco envolvido, da sua tolerabilidade e da atitude do Dono de Obra (Caldeira, *op. cit.*).

Nos contratos consignados com base num projecto de execução, em planos de trabalhos e com revisão de preços, é o Dono de Obra que suporta a maior parte do risco geotécnico, o qual é tipicamente expresso como “condições do terreno não previstas” (*op. cit.*). Quando tal não é aceitável são usadas, de modo crescente, formas de contrato que colocam este risco nas companhias de seguros e nas empresas de construção. Qualquer que seja a forma do contrato, os riscos geotécnicos serão melhor geridos quando os especialistas em Geotecnia, em representação de todas as partes envolvidas, se reúnam tão cedo quanto possível, durante o período de lançamento de concursos e de negociação dos contratos. As melhores cláusulas contratuais são aquelas em que os recursos técnicos do Dono de Obra, do Projectista e do Empreiteiro são combinados, de modo a ultrapassar as dificuldades relacionadas com o terreno, logo que estas se tornem aparentes. Ao Empreiteiro cabe claramente assumir o risco nas áreas em que pode exercer um controlo razoável. A selecção de meios e métodos de construção, os equipamentos e os processos de trabalho devem estar incluídos no risco assumido pelo Empreiteiro. O impacto dos riscos sobre a segurança dos funcionários é também da responsabilidade do Empreiteiro, embora, do ponto de vista financeiro, possam ser transferidos para uma Seguradora.

No que diz respeito à alocação de risco, Stareven (2006) distingue quatro tipos principais:

- ✓ Risco exclusivamente assumido pelo Dono de Obra que tem de lidar com as consequências (custos), se o mesmo ocorrer;
- ✓ Risco exclusivamente assumido pelo Empreiteiro que tem de lidar com as consequências (custos), se o risco se materializar;
- ✓ Risco totalmente partilhado entre Dono de Obra e o Empreiteiro: o risco é inteiramente atribuído a ambas as partes e, em conjunto, têm de definir as medidas correctivas, bem como a parte que vai assumir os custos, se o risco se materializar;
- ✓ Risco parcialmente partilhado, em que uma parte do risco é da responsabilidade do Dono de Obra e a parte restante é da responsabilidade do Empreiteiro: neste caso o risco é parcialmente atribuído a um e a outro interveniente, por mútuo acordo, com estabelecimento prévio de regras base.

A ferramenta mais utilizada para a alocação de riscos é uma simples tabela ou matriz de alocação de risco (Quadro 4.1). As matrizes de alocação são uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de contratos do tipo Conceção - Construção. Fornecem um quadro detalhado para a tomada de decisões sobre a alocação do risco em cada projecto. São também aplicáveis a projectos com contratos tradicionais do tipo Conceção – Concurso – Construção ou a projectos que utilizem outro tipo de contrato inovador. Todos os riscos relacionados com as condições do local devem ser assumidos pelo Dono de Obra. A maneira mais adequada de geri-los será através de prospecção, caracterização geotécnica e com a incorporação de cláusulas no contrato.

**Quadro 4.1. Exemplo de uma matriz de alocação do risco (Ashley *et al.*, 2006, adaptado).**

Risco	Entidade recomendada para assumir o risco	Forma como o risco é atribuído ou gerido
Acesso ao local	Dono de obra	Planeamento avançado ou aquisição
Meios e métodos de construção	Empreiteiro	Cláusula específica no contrato
Condições geotécnicas do local	Dono de obra	Prospecção geotécnica e cláusula no contrato
Condições meteorológicas, actos de Deus	Partilha (Dono de Obra suporta os atrasos sofridos; o Empreiteiro suporta os custos do risco)	Cláusula no contrato

Existem basicamente três importantes razões pelas quais o Dono de Obra deve partilhar os riscos associados com as condições geológicas associadas ao projecto (Zhou & Cai, 2007):



- ✓ É a entidade que desenvolve o conceito do projecto o que, entre outras coisas, inclui parâmetros como a localização, o alinhamento, o traçado, o recobrimento, a dimensão das escavações, bem como os requisitos funcionais;
- ✓ Ele é o proprietário do terreno e, na maioria dos casos, fornece os dados da prospecção e caracterização do local. A adequação e exactidão desses trabalhos irão influenciar fortemente a forma como as diferentes partes prevêm as condições do terreno;
- ✓ Ele impõe um cronograma; este pode ser um ponto discutível, pois muitas vezes o Empreiteiro encontra dificuldades no cumprimento do cronograma imposto. Como resultado algumas medidas de gestão de risco durante a construção podem ser comprometidas.

A alocação do risco deve ser oportuna e justa. Embora todos os riscos não possam ser alocados, é imperativo que Empreiteiros e Donos de Obra, face ao risco geotécnico inerente aos projectos subterrâneos, tentem alocá-lo correctamente. De seguida será apresentado a partilha do risco em túneis segundo a prática norueguesa.

#### **4.3.2 Método norueguês**

A Noruega tem uma longa tradição na construção de túneis em maciços rochosos. Nos túneis da Noruega a partilha do risco é considerada parte integrante do *Norwegian Method of Tunnelling*, com a maioria dos projectos subterrâneos a serem adjudicados com base em contratos de preço unitário. O conceito de resposta aos riscos geotécnicos é centrado na partilha do risco. Este conceito de partilha de risco destina-se a abordar dois elementos de risco (NFF, 2004 *in* Zhou & Cai, 2007):

- ✓ As condições do terreno: como o Dono de Obra é também o proprietário do terreno, ele é responsável pelas condições do terreno e pelos resultados dos estudos conduzidas por ele. Se estes forem insuficientes, devem permanecer como um problema do próprio;
- ✓ Desempenho: o Empreiteiro é responsável pela boa execução dos trabalhos, sendo reembolsado de acordo com os preços unitários propostos para os trabalhos concluídos. Tais trabalhos incluem as condições geológicas encontradas. O elemento

tempo é ajustado com base em capacidades padrão pré-definidas para diferentes tarefas.

A Figura 4.2 ilustra o conceito de alocação de riscos através da prática norueguesa, e de acordo com as diversas modalidades contratuais. A abordagem consiste numa forma de contrato em que o risco é partilhado, desde que seja considerado o melhor produto em termos de custo global da obra, *i.e.*, o seu custo é reduzido ao mínimo. Desta maneira o Dono de Obra mantém especialistas geotécnicos que têm a responsabilidade de identificar os riscos geotécnicos e determinar os meios adequados para enfrentá-los através da prospecção do local, interpretação e soluções de projecto e de construção. De seguida, ele fornece aos Proponentes a divulgação plena de toda a documentação relativa à obra e recalcula a forma de pagamento para os métodos e materiais mais prováveis que sejam necessários. Esta abordagem representa o melhor julgamento do Dono de Obra sobre a percepção e a forma de lidar com as condições do terreno.



Figura 4.2. Otimização conceitual da partilha de risco segundo a prática norueguesa (Grønv, 2008, adaptado).

Como já referido, a partilha dos riscos associados a eventos imprevisíveis pode melhorar substancialmente o sucesso de um contrato, tanto em termos de custos como de controlo do cronograma. Quando o regime financeiro global e contratual o permite, pode ser possível a todas as partes estarem em concordância, *e.g.*, através de conjunto de condições de partilha de riscos (Hoek & Palmieri, 1998). No Quadro 4.2 é apresentado um exemplo de um conjunto de condições de partilha de riscos para um túnel que atravessa maciços calcários carsificados miocénicos e dolomíticos jurássicos, com 5020 m de comprimento, 3,5 m de diâmetro final e em que o recobrimento varia de 80 a 200m. Neste projecto específico, as condições geológicas gerais indicaram um potencial para a ocorrência de cavidades cársicas

de tamanho considerável. Foram elaborados e acordados por ambas as partes no contrato, um conjunto de limites baseados na experiência da construção de túneis semelhantes. Note-se que as classificações dos maciços rochosos são utilizadas para orientação geral sobre as condições que poderão ser encontradas no túnel, mas não são utilizadas para a medição das quantidades limite. De referir ainda que o Quadro 4.2 também pode ser parte integrante de um RGR (ver 4.4).

**Quadro 4.2. Exemplo de um conjunto de condições de partilha de riscos (Hoek & Palmieri, 1998, adaptado).**

<b>Qualidade do maciço rochoso (RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Barton <i>et al.</i>, 1974)):</b>			
Descrição:	RMR	Q	Extensão (m)
Maciço ligeiramente diaclasado	68 a 79	30 a 75	2600
Muito diaclasado	44 a 59	1,3 a 18	1650
Fracamente cimentado	39 a 57	0,8 a 3	670
Zonas de falha, cavidades cársticas	Não aplicável	Não aplicável	100

<b>Descrição do risco</b>	<b>Partilha do risco</b>
Qualidade do maciço rochoso ao longo do alinhamento	Uma vez que o principal risco está associado com a presença de grandes cavidades cársticas e a qualidade média da rocha é razoável a boa, os desvios da distribuição assumida podem ser incluídos nos riscos suportados pelo Empreiteiro.
Presença de água subterrânea	O afluxo de água no túnel está dentro do risco suportado pelo Empreiteiro até serem atingidos os seguintes limites: a) 20 l/s na frente do túnel; b) 50 l/s nos emboquilhamentos do túnel; c) Coluna de água com altura inferior a 50 m.
Cavidades cársticas	Limites de risco do Empreiteiro: a) Tamanho da cavidade não exceda o vão do túnel (4 m); b) Fluxo de água não superior a 20 l/s, diminuindo para menos de 20 l/min dentro de 3 dias; c) Cavidade não contém enchimento de solo mole, que possa fluir, caso se encontre no estado não confinado; d) Atrasos causados pela ocorrência de cavidades não podem exceder os 30 dias.
Presença de gás	A possibilidade da presença de gases tóxicos ou inflamáveis é negligenciável; o Dono de Obra deve suportar o correspondente risco.

Devido à grande variedade de contratos utilizados em grandes projectos de Engenharia Civil, as orientações gerais são difíceis de formular. No entanto, os objectivos gerais são os mesmos e a necessidade de minimizar custos e derrapagens no cronograma e os conflitos subsequentes são comuns a todos os tipos de contratos. O contrato estabelecido entre o Dono de Obra e o Empreiteiro visa definir os requisitos do projecto subterrâneo para atribuir as responsabilidades pela sua realização, bem como estabelecer o seu custo. Um bom contrato não se limita a dividir as responsabilidades do projecto, ele é uma força unificadora, um acordo comprometendo ambas as partes para um único objectivo comum (US Academy of Sciences, 1976 *in* Hoek & Palmieri, 1998).

#### 4.4 RELATÓRIO GEOTÉCNICO DE REFERÊNCIA (RGR)

Mesmo com um programa de prospecção e caracterização geotécnica muito elaborado, a eliminação de todos os riscos geotécnicos é extremamente improvável. Com a crescente ênfase na redução de custos nos mercados de construção altamente competitivos, o corte destes programas é uma realidade que tem de ser enfrentada. Por conseguinte, a fim de minimizar as onerosas disputas, é essencial dar uma atenção cuidada às formas contratuais relativas a grandes projectos. Um conceito significativo neste contexto é o de relatório geotécnico de referência, que visa estabelecer uma compreensão contratual das condições geotécnicas, através de valores de referência (Essex, 1997).

O RGR resultou da procura de medidas para enfrentar os altos e incertos custos associados a projectos subterrâneos nos Estados Unidos na década de setenta, que tornavam quase impossível a construção de túneis. Nos anos noventa o conceito do RGR é desenvolvido e aplicado com sucesso em diversos projectos. Na prática, hoje, o RGR é incluído como parte do contrato, e serve como declaração contratual da antecipação das condições geotécnicas a encontrar, durante a construção subterrânea. O mesmo estabelece valores quantitativos para condições geotécnicas que possam ter um grande impacto na construção, através da interpretação técnica dos dados e considerações comerciais de partilha de riscos. Se as condições encontradas são melhores que as de referência, todos os riscos são atribuídos ao Empreiteiro. Inversamente se as condições forem significativamente piores, os riscos associados a elas são atribuídos ao Dono de Obra. Quanto melhor definidas forem as condições previstas, mais facilmente as condições encontradas podem ser avaliadas. Como recompensa, na fase de concurso, o Dono de Obra irá ter um preço mais realista, apresentado pelos Empreiteiros.

O RGR não se trata do relatório de caracterização geotécnica do EC7 (CEN, 2004), destinado a suportar o projecto; no entanto fornece uma interpretação realista das condições subterrâneas. Este não deve incluir apenas as condições médias do comportamento do terreno e águas subterrâneas previstas, mas deve igualmente abordar a gama de variações esperada para essas características.

A definição dos valores de referência (Quadro 4.3) depende da margem de risco que o Dono de Obra está disposto a correr para compensar os desvios. O objectivo principal do RGR é “definir valores de referência, para antecipar condições geotécnicas, que podem ser

encontradas durante a construção subterrânea, a fim de fornecer no contrato indicações claras para a resolução de litígios relativos a essas condições” (Essex, 1997).

**Quadro 4.3. O conceito de valores de referência e RGR (Staveren, 2006, adaptado).**

Risco relacionado com o terreno	Factor de risco chave	Valor de referência	Alocação do risco	
			Empreiteiro	Dono de Obra
Assentamentos inaceitáveis	Espessura da camada de argila	5 m	$\leq 5$ m	$> 5$ m
	Compressibilidade da camada de argila	6 m <sup>2</sup> /kN	$\geq 6$ m <sup>2</sup> /kN	$< 6$ m <sup>2</sup> /kN
Afluxo de água	Permeabilidade da rocha fracturada	10 cm/s	$\leq 10$ cm/s	$> 10$ cm/s

A aplicação efectiva do RGR em projectos de construção varia de país para país e de projecto para projecto. Orientações sobre a forma e o seu uso são apresentadas num documento da *American Society of Civil Engineers* (ASCE) em 1997 (Essex, 1997), e posteriormente actualizado em 2007 (ASCE, 2007). Este mesmo documento descreve três tipos de relatórios geotécnicos que podem ser preparados: relatório de dados geotécnicos; relatório geotécnico interpretativo; e o relatório geotécnico de referência.

O mesmo define ainda quem deverá usar o RGR (Essex, 1997):

- ✓ Projectista, como base para a elaboração de uma estimativa do custo de construção;
- ✓ Proponentes durante a fase de licitação, para uma indicação contratual da antecipação das condições do subsolo e riscos geotécnicos alocados ao Empreiteiro;
- ✓ Empreiteiro, para a selecção de métodos e equipamentos de construção;
- ✓ Empreiteiro e Dono de Obra durante a construção, para avaliar as condições do subsolo e identificar diferentes condições do terreno conforme o avanço da construção;
- ✓ Partes contratantes, para a resolução de litígios relacionados com as condições encontradas, que são reivindicadas como sendo mais adversas do que o inicialmente indicado.

O documento da ASCE (Essex, 1997) contém uma lista de verificação para a elaboração de um RGR. Este deve ter como conteúdo mínimo:

- ✓ Fontes de informação;
- ✓ Descrição sumária do projecto;
- ✓ Descrição da área de implantação;
- ✓ Enquadramento geológico da área;

- ✓ Caracterização geotécnica do terreno;
- ✓ Considerações prévias sobre a concepção/projecto;
- ✓ Considerações prévias sobre o processo construtivo;
- ✓ Referências.

De forma mais específica, alguns dos itens normalmente abordados num RGR incluem (*op. cit.*):

- ✓ A quantidade e distribuição dos diferentes materiais ao longo do alinhamento seleccionado;
- ✓ Descrição da resistência, compressibilidade, granulometria e permeabilidade dos materiais existentes;
- ✓ Descrição da resistência e permeabilidade do maciço como um todo;
- ✓ Níveis e condições esperadas das águas subterrâneas, incluindo valores de referência para as estimativas de fluxo e taxas de bombeamento;
- ✓ Previsão do comportamento do terreno, e influência das águas subterrâneas, no que diz respeito aos métodos de escavação e instalação do suporte;
- ✓ Impactes da construção em instalações adjacentes;
- ✓ Potenciais perigos geotécnicos e antrópicos que poderão afectar a construção, incluindo a presença de falhas, gases, queda de blocos, cavidades cársticas, existência de fundações por estacas, etc.

O RGR estabelece uma base comum e realista para todos os Empreiteiros usarem na elaboração das suas propostas e, posteriormente, uma base para avaliar quaisquer disputas por parte dos mesmos da ocorrência de diferentes condições de terreno que se desenvolvam durante a construção (Zhou & Cai, 2007). Para evitar a subjectividade associada à abordagem “razoavelmente previsível”; existe um movimento no sentido da utilização de uma cláusula DSC no contrato, *i.e.*, para condições geotécnicas reais que diferem muito das condições preconizadas face aos elementos disponíveis na fase de projecto.

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 1996), elaborou um documento que fornece orientações sobre a aplicação prática dessa cláusula no contrato em relação às condições do subsolo, e contemplando a natureza variável dos solos e materiais rochosos, quando

utilizados como fundação ou material de construção. O objectivo destas recomendações é, em parte, diminuir a proposta das elevadas medidas contingentes, para os inesperados problemas do subsolo, e fornecer uma base para a resolução justa das disputas contratuais, que daí advenham. Sem uma cláusula DSC, o risco de ocorrência de condições do subsolo é suportado pelos Empreiteiros, que por sua vez aumentariam a proposta de preços para o mitigar. Este documento (FHWA, *op. cit.*) define dois tipos de inconformidades geotécnicas:

- ✓ Tipo I - Condições físicas com diferenças materiais (de extensão ou intensidade, não de natureza) relativamente ao definido no contrato;
- ✓ Tipo II - Condições físicas desconhecidas duma natureza diferente das ordinariamente encontradas ou geralmente reconhecidas como inerentes ao trabalho previsto no contrato.

A oportunidade para a elaboração do RGR caduca com o lançamento do concurso de construção. A inadequação ou inexistência do RGR favorece a ocorrência de inconformidades do tipo I. As vantagens deste relatório residem na facilidade em administrar cláusulas contratuais, na determinação inequívoca do direito, na clarificação da proposta do Empreiteiro e na clara repartição de riscos entre ele e o Dono de Obra.

Em Portugal, e na generalidade dos contratos, existem de facto cláusulas que prevêm a possibilidade de o Empreiteiro ter direito a compensações. Isso compreende-se na medida em que ele é capaz de executar uma obra em determinadas condições, previstas no projecto, podendo as condições reais diferir muito das preconizadas com base nos elementos disponíveis na fase de projecto e, nesses casos, o Empreiteiro não pode, evidentemente, suportar os custos derivados dessa situação porque no cálculo do preço da empreitada não tinha hipótese de atender a essa eventualidade.

O conceito de RGR é muito atraente mas na prática pode ter alguns problemas, tais como:

- ✓ As condições encontradas não são cobertas pelo relatório inicial;
- ✓ O método de verificação de valores de referência pode ser questionado (*e.g.*, se a resistência à compressão em laboratório de uma determinada rocha corresponde à da rocha *in situ*). Portanto, deve ser claramente especificado a que tipo de medida se referem os valores de referência e como devem ser verificados durante a construção;

- ✓ Se os valores forem ultrapassados, o Empreiteiro tem direito a pedir indemnização. O caderno de encargos, para o caso, deverá incluir cláusulas de reajuste para o tempo e custo. Se essas cláusulas não são fornecidas, o RGR não conseguirá evitar disputas.

A complementação do RGR por um sistema de classificação poderia ajudar a chegar a uma compensação ponderada para a incidência de vários factores, dando pesos para as condições da rocha, largura do vão mais segura, afluxo de água, escavação, classes de suporte, etc. Freeman *et al.* (2009) apresentam uma série de sugestões para melhorar a eficácia dos RGR, baseadas na experiência obtida em muitos projectos de túneis. Essas sugestões complementam as orientações da ASCE e proporcionam a criação de RGR mais úteis e de melhor qualidade.

Embora o RGR seja referido no *Code of Practice* (ITIG, 2006), da iniciativa do sector de Seguros, ele é um documento preparado para a alocação do risco comercial entre o Dono de Obra e o Empreiteiro. Portanto, o RGR não é especificamente relevante para o seguro sobre a obra. No entanto, a Seguradora ganha confiança, se os riscos de projecto forem considerados pelo Empreiteiro na preparação da sua proposta, ou se existe um RGR. Esse relatório vai chamar a atenção para questões com um impacto comercial e garantir eventualmente uma proposta mais adequada.

Assim sendo, o uso de cláusulas para a ocorrência de diferentes condições do terreno, juntamente com um RGR, têm o potencial de ser uma forma eficaz de implementar uma abordagem de partilha de risco para as condições do terreno em projectos de construção subterrânea na qual, se surgirem diferenças significativas relativamente ao expectável, os riscos são assumidos, em parcelas pré-definidas, pelo Dono de Obra e pelo Empreiteiro. No entanto, deve ser reconhecido que a qualidade e o valor do RGR dependerão da forma rigorosa como as questões geotécnicas fundamentais são abordadas e comunicadas entre as várias partes. O RGR deve funcionar, na gestão dos riscos geotécnicos, como catalisador para uma colaboração mais estreita entre o Dono de Obra, o Projectista e o Empreiteiro.



## 5 GESTÃO DO RISCO GEOTÉCNICO NA FASE CONSTRUTIVA

Neste capítulo, é feita uma abordagem à gestão do risco durante a fase construtiva de um túnel. Para além de certas generalidades relativas a esta fase, são descritas as responsabilidades das partes intervenientes pela gestão do risco. É dada ênfase à observação e controlo do risco, que nesta fase se pretende que seja residual, isto, através do uso do MO. São referidos os equipamentos de instrumentação mais usuais nestas obras, é feita uma breve referência ao registo dos dados recolhidos e à sua comunicação, e a definição de níveis de alerta e de alarme. Finaliza-se este capítulo com uma descrição sumária de duas ferramentas de controlo do risco nesta fase: um documento designado de RR e, uma abordagem implementada em projectos recentes, o PAT.

### 5.1 GENERALIDADES

Existem duas atitudes possíveis para gerir o risco na fase construtiva. Aplicando uma gestão do risco “dura” ou então, uma “suave” (Thomas & Banyai, 2007). A chamada gestão do risco “dura” é uma aplicação formal e sistemática, frequentemente aplicada sempre que existam imperativos legais ou fortes exigências por parte do Dono de Obra ou de terceiros. Esta pode ser caracterizada por procedimentos obrigatórios, tais como revisões diárias, um programa fixo de actividades (*e.g.*, *workshops*), e uma vontade explícita de documentar todo o processo. Esta última é, em parte, para benefício da equipa do projecto, pois frequentemente são geradas auditorias que servem, deste modo, sempre que seja necessário, como prova para outros, de que o projecto está a ser bem gerido.

Em oposição, a aplicação “suave”, pode ser caracterizada pela adopção de uma gestão de risco como um *ethos* para o projecto que impregna as suas actividades. Ferramentas comuns, tais como *workshops* de risco e RR, aparentam ser uma abordagem mais formal, no entanto estes são usados mais numa base *ad hoc*. A equipa de projecto aplica-os quando sente necessidade para tal, em oposição a um calendário pré-definido (*e.g.*, quando um túnel se aproxima de áreas de alto risco, como a passagem sob outro túnel ou um vale de um rio), a equipa pode decidir reunir o Dono de Obra, Projectista e Empreiteiro, para rever os possíveis riscos e as medidas de mitigação planeadas.

Durante a fase de construção, todas as medidas de remediação de riscos adoptadas são realmente testadas, na prática. Neste enquadramento, o processo GeoQ (Staveren, 2006), já introduzido, (ver 2.5), visa proporcionar uma gestão de risco relacionado com o terreno de forma estruturada durante todo o processo de construção, de acordo com os perfis de risco acordados e as condições do terreno que possam ser encontradas. Idealmente, nesta fase, devem ser executadas todas as seis etapas que contemplam o processo GeoQ.

Os riscos geotécnicos durante a construção são geridos através de cuidadosas especificações existentes no caderno de encargos. O mesmo terá de especificar os limites e medidas de desempenho, os principais trabalhos de redução do risco e as medidas de contingência previstas. De forma a prevenir ocorrências adversas, é necessária a implementação de um plano de gestão do risco residual durante a construção, que inclua uma cautelosa gestão dos procedimentos de escavação, com transmissão dos respectivos dados das operações em tempo real. Para obter uma construção segura e económica, é necessária uma abordagem baseada na observação e controlo da escavação. Para tal sugere a criação de um plano de gestão de segurança geotécnica que deve ter em conta os seguintes elementos básicos (Schubert, 2007):

- ✓ Definição dos parâmetros a serem observados;
- ✓ Definição do comportamento esperado da estrutura subterrânea durante a construção (assentamentos, convergências, assentamentos superficiais, etc.) e os limites de tolerância admitidos;
- ✓ Definição de métodos de monitorização, localização, quantidade e frequência das leituras;
- ✓ Definição dos níveis de alerta e alarme;
- ✓ Organização necessária para realizar a monitorização, tratamento de dados, avaliação, interpretação e comunicação estruturada entre as partes envolvidas;
- ✓ Procedimentos e medidas no caso de ocorrer um desvio no comportamento esperado;
- ✓ Procedimentos para o caso de crise, incluindo os critérios de alarme, organização e estabelecimento de prioridades;
- ✓ Planeamento da construção;
- ✓ Actualização das previsões feitas durante o projecto, em conformidade com as novas informações.

Ainda nesta fase podem, e devem, ser efectuados quando necessário, estudos geológico-geotécnicos, para obtenção de informações de apoio à revisão do projecto, a fim de garantir a existência de uma margem de segurança e desempenho adequada (TGN24, 2009). Para as frentes expostas do túnel, a prospecção deve incluir a cartografia geológica, e uma avaliação das secções do túnel usando o mesmo esquema de classificação de maciços terrosos/rochosos, em que se baseou o projecto. Dependendo do método de escavação do túnel e da avaliação do risco, podem ser realizadas sondagens em avanço a partir da frente. Deste modo devem ser avaliadas as condições do terreno na frente, em especial nas interfaces solo/rocha e em secções com afluxo de água potencialmente elevado, e para averiguar a necessidade da implementação de medidas de mitigação, ainda antes da escavação de determinadas secções do túnel.

Actualmente, existem muitos países europeus que exigem para cada projecto de túnel, antes da construção, a realização de um processo preliminar de avaliação de risco. Assim sendo, durante a construção são realizadas auditorias periódicas para determinar se um projecto é bem sucedido, executando a gestão do risco. Nos Estados Unidos, a indústria da construção de túneis está a tornar-se muito sintonizada com a necessidade da gestão do risco, e um bom Plano de Observação pode ajudar a reduzir a possibilidade de ocorrência de grandes problemas (Hung *et al.*, 2009). Além disso, um bom Plano de Observação tem o potencial de se pagar a si próprio, muitas vezes através das poupanças geradas relativas aos incidentes que foram evitados. Assim sendo, a gestão de riscos apoiada por uma boa instrumentação e monitorização pode ser muito rentável. A etapa de observação e controlo fecha o ciclo da gestão do risco, que se repetirá por mais ciclos, quantos os que forem necessários para reduzir o risco ao máximo (Flores, 2006).

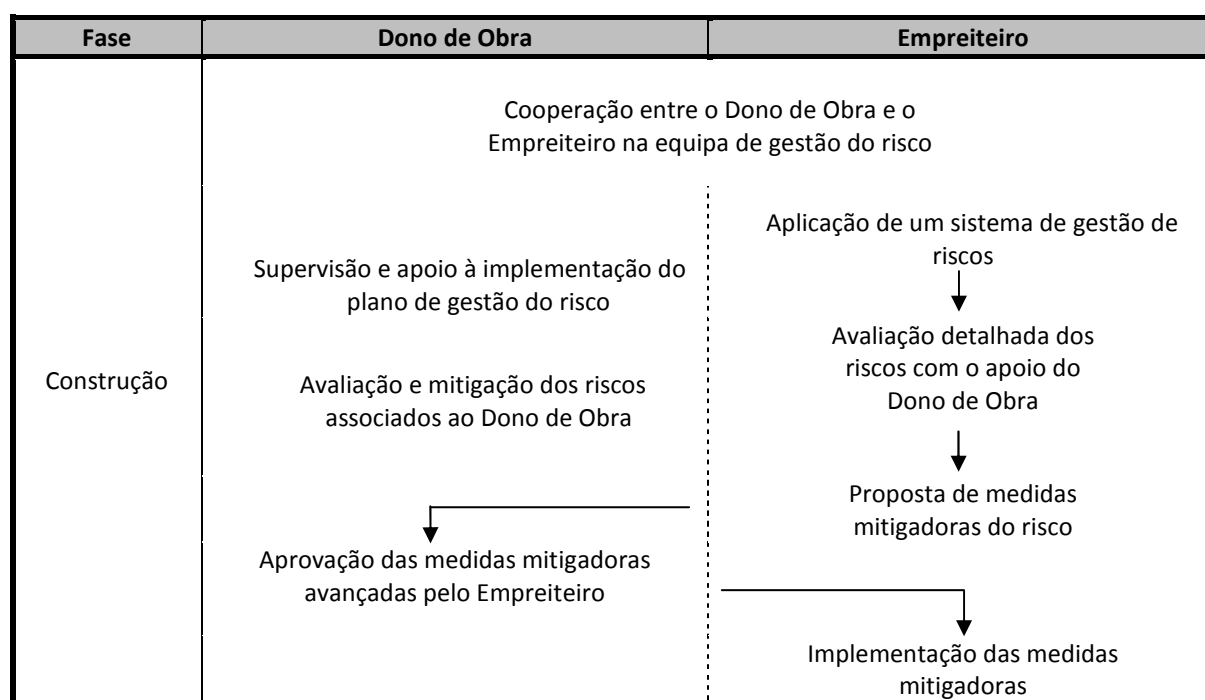
## 5.2 RESPONSABILIDADE DA GESTÃO

No início da construção é deixado normalmente um número de riscos residuais como resultado das incertezas naturais do terreno, incluindo os riscos conhecidos que não podem ser evitados, ou que ainda não foram identificados. Daí que no caderno de encargos devam ser claramente definidas as responsabilidades no que respeita à instalação, calibração, fornecimento de dados de referência, monitorização, fluxo de informações, interpretação e relatórios de dados dos equipamentos de instrumentação, que permitam gerir esses riscos.

Para tal, as condições do contrato devem proporcionar a aptidão necessária para os intervenientes executarem, de forma rápida, os trabalhos de estabilização, de acordo com os resultados que vão sendo obtidos.

Eskesen *et al.* (2004 *in* Barbosa, 2008) definem de forma clara e explícita as responsabilidades dos intervenientes na gestão do risco durante a construção. Nesta fase, o principal responsável pela implementação do sistema de gestão do risco é de facto o Empreiteiro. Na perspectiva do Dono de Obra, a principal preocupação é a estabilidade do túnel, a sua função é supervisionar e apoiar o Empreiteiro nesta gestão e aferir e mitigar os riscos que ainda lhe estão associados. Para uma gestão do risco eficiente é importante uma boa cooperação entre o Dono de Obra e o Empreiteiro numa equipa mista (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1. Gestão do risco entre o Dono de Obra e o Empreiteiro na fase de construção (Eskesen *et al.*, 2004, adaptado).**



Na fase inicial do projecto, ou durante a avaliação das propostas e negociações contratuais, certos riscos podem ser transferidos contratualmente, ou segurados, outros podem ser mantidos e alguns podem ainda ser evitados ou mitigados. Durante a construção, a capacidade de transferir o risco é mínima. Desta forma, a estratégia mais vantajosa tanto para o Dono de Obra como para o Empreiteiro é de reduzir ao máximo a sua magnitude, através do planeamento e da implementação de medidas para evitar ou mitigar os riscos (Barbosa, 2008).

Quanto à gestão do risco por parte do Empreiteiro durante a construção, o sistema que utilize deve ser compatível com o do Dono de Obra. A detecção precoce e a rápida adopção de medidas mitigadoras são a chave para um controlo eficaz do risco. Neste sentido, é importante que os processos de identificação, avaliação e mitigação dos riscos sejam completamente compreendidos pelo Empreiteiro de modo a agilizar todo este processo (Barbosa, *op. cit.*, adaptado).

A identificação e o controlo dos riscos e técnicas envolvidas devem ser vistas como uma parte essencial das actividades de construção. O Empreiteiro deve elaborar e actualizar o chamado RR (ver 5.4), que contém todos os detalhes sobre os riscos identificados e a sua avaliação. Os resultados devem ser divulgados para prevenir eventos semelhantes e para melhorar o sistema de gestão implementado. Os planos de contingência para situações de risco devem ser elaborados e mantidos durante o período de construção.

No que respeita à gestão do risco por parte do Dono de Obra durante a construção, este deve continuar a gerir os riscos que lhe são imputáveis. A implementação de medidas mitigadoras associadas àqueles é da sua responsabilidade. Ele deve também encorajar e monitorizar a gestão do risco realizada pelo Empreiteiro através de, *e.g.*, auditorias de qualidade. A monitorização permite ao Dono de Obra permanecer informado sobre os riscos identificados pelo Empreiteiro, assegurando-se desta forma que a gestão de risco está a ser correctamente implementada. O Dono de Obra ou a equipa mista devem procurar, durante a construção, discrepâncias entre as medidas mitigadoras previstas e as realmente aplicadas. Este controlo permite determinar quais as falhas no sistema de gestão de risco do Empreiteiro e corrigi-las (Barbosa, *op. cit.*).

### 5.3 OBSERVAÇÃO E CONTROLO DO RISCO RESIDUAL

Durante a construção, a melhor maneira de gerir os riscos é, através da observação e controlo da execução do túnel, para verificar se ele está a comportar-se como preconizado pelo Projectista. Prever o acontecimento de um evento geotécnico adverso (*e.g.*, o assentamento excessivo de um edifício que se situa nas proximidades das escavações de um túnel) faz parte da análise do risco. A qualidade da previsão depende da monitorização dos elementos precursores (Longo & Gama, 2004). Estes elementos são pequenas variações físicas que antecedem o evento adverso (*e.g.*, aumento excessivo de convergências, que poderá levar à criação de fracturas ou fissuras no sustimento de betão projectado). Assim

sendo, na construção moderna de túneis, a instrumentação do local, é sem dúvida, um elemento indispensável e os seus objectivos devem ser os seguintes (ITA, 2009):

- ✓ Verificar o comportamento estrutural no que diz respeito à segurança e/ou critérios de utilização, principalmente durante a construção e, em alguns casos, durante a sua vida útil;
- ✓ Quantificar a resposta estrutural a um método específico de construção e verificar a eficácia das medidas específicas de suporte;
- ✓ Comparar as previsões teóricas com o comportamento real estrutural e a avaliar os parâmetros do terreno;
- ✓ Verificar o comportamento das estruturas e instalações adjacentes e, a sua segurança e utilização, como resultado da construção do túnel;
- ✓ Evitar litígios entre parceiros contratuais ou entre o Dono de Obra e terceiros, através do registo de dados relacionados com a construção do túnel e os efeitos sobre as instalações adjacentes.

A implementação de um Plano de Observação, deve estender-se à área de influência do túnel, e visa recolher informação sobre o comportamento do maciço em resposta à escavação. O plano deve ser estabelecido em função das condições geológico-geotécnicas, da geometria do traçado e dos cenários de risco associados aos processos construtivos, definindo os equipamentos, a frequência das leituras, o tipo de tratamento dos dados obtidos e os níveis de alerta, abaixo dos quais se consideram aceitáveis os valores medidos (Vieira *et al.*, 2010).

Articulada com a Observação devem definir-se Planos de Contingência. O desenvolvimento destes planos é uma componente de uma gestão de riscos “activa”, uma vez que permitem o desencadear de diferentes respostas de acordo com uma estratégia pré-planeada em função da ocorrência de determinados eventos futuros, *i.e.*, ele deve conter os procedimentos a seguir, caso a monitorização revele um comportamento da estrutura fora dos limites aceitáveis. São exemplos de medidas de contingência previstas num túnel em construção:

- ✓ No caso de serem atingidos os níveis de alerta:
  - Leituras diárias em todos os aparelhos na zona de intervenção do local onde se verificam os deslocamentos em causa;

- Avaliação da situação, com reformulação de cálculos ajustando-os à situação em causa e à história de deslocamentos verificada;
- ✓ No caso de serem atingidos os níveis de alarme:
  - Paragem dos trabalhos na zona em causa e aplicação imediata de reforço, *e.g.*, do número de escoras;
  - Leituras diárias em todos os aparelhos na zona de intervenção do local em causa, com eventual reforço da instrumentação.

É certo, que dependendo do local (meio urbano ou zona montanhosa) onde o túnel é construído o controlo (*e.g.*, das deformações do terreno) será distinto (Kavvadas, 2003).

Nos túneis em zonas de montanha, o objectivo das medições principais de deformação durante a construção é garantir que a pressão do terreno está adequadamente controlada, ou seja, que existe uma margem de segurança adequada em relação ao colapso, incluindo o tecto, empolamento da soleira, rotura da frente de escavação ou do sustimento, etc. O controlo adequado da pressão do terreno permite a adaptação à heterogeneidade das condições do terreno, garantindo a segurança e a economia da estrutura.

Pelo contrário, nos túneis urbanos, o objectivo principal da monitorização das deformações do terreno, é limitar os deslocamentos a valores suficientemente baixos para evitar danos às estruturas e aos serviços públicos que se encontram à superfície do terreno. Assim, a diferença fundamental na monitorização das deformações decorre do facto de, nos túneis em zonas montanhosas, o objectivo ser a protecção contra um estado limite último (*i.e.*, colapso), enquanto em túneis urbanos, o objectivo é proteger contra o estado limite de utilização (*i.e.*, o início da fissuração) de estruturas e serviços públicos (Kavvadas, *op. cit.*).

O projecto de um túnel deve ser suficientemente dinâmico e flexível nas soluções propostas e nos métodos de intervenção para, durante a fase de construção, se adaptar, em tempo útil, à realidade observada *in situ*, numa tentativa de optimização dos recursos disponíveis. Daí a importância do adequado acompanhamento deste tipo de obras geotécnicas por técnicos especializados. Deste modo, ter um representante da equipa de projecto no local, é um auxílio para a análise das propostas de alteração ao método de construção e interpretação dos dados da monitorização (Thomas & Banyai, 2007). Além de contribuir para a gestão dos riscos, o benefício da presença do Projectista no local, permite a percepção das

oportunidades e, com elas, advêm, para o Dono de Obra, os benefícios nos custos e no cumprimento dos prazos.

Os resultados da monitorização valorizam, muitas vezes, a visão do padrão de deformação do terreno e dos mecanismos de rotura. Deste modo, esses resultados podem ser usados para avaliar o comportamento estrutural em matéria de segurança e/ou requisitos de utilização. Nesses casos, a determinação do comportamento aceitável deve incluir os valores limite de parâmetros chave. Desvios do comportamento deformacional ocorrido, como uma aceleração inesperada, durante várias leituras, sem actividades construtivas em curso, nas proximidades da secção monitorizada, devem ser analisados imediatamente. Esses procedimentos podem, obviamente, ser aplicados apenas em caso de comportamento estrutural dúctil. A tomada de decisão com base em medições é impossível quando o comportamento estrutural é frágil (*e.g.*, explosões de rocha ou instabilidades na frente do túnel), com as previsões dos valores de deformação, próximos do colapso, a serem altamente confiáveis.

Como já referido, a monitorização é essencial para desencadear acções de controlo aquando da detecção do risco. Quando a detecção de risco é atrasada, ocorre um aumento do risco de rotura ou até a própria rotura, causando um acidente, colapso, etc. Uma detecção rápida e precoce é crucial para providenciar tempo suficiente para que seja possível o desenvolvimento de uma acção correctiva, a fim de retornar os níveis de risco para valores aceitáveis. Segundo o HSE (1996, *in* Neto & Kochen, 2000), assumindo que, antes da construção do túnel, tenham sido feitos todos os esforços para reduzir os riscos, mantendo o nível de risco o mais baixo possível, devem, na construção, ser utilizados os mecanismos de “detecção do risco – acção correctiva”, respectivamente (Figura 5.1).



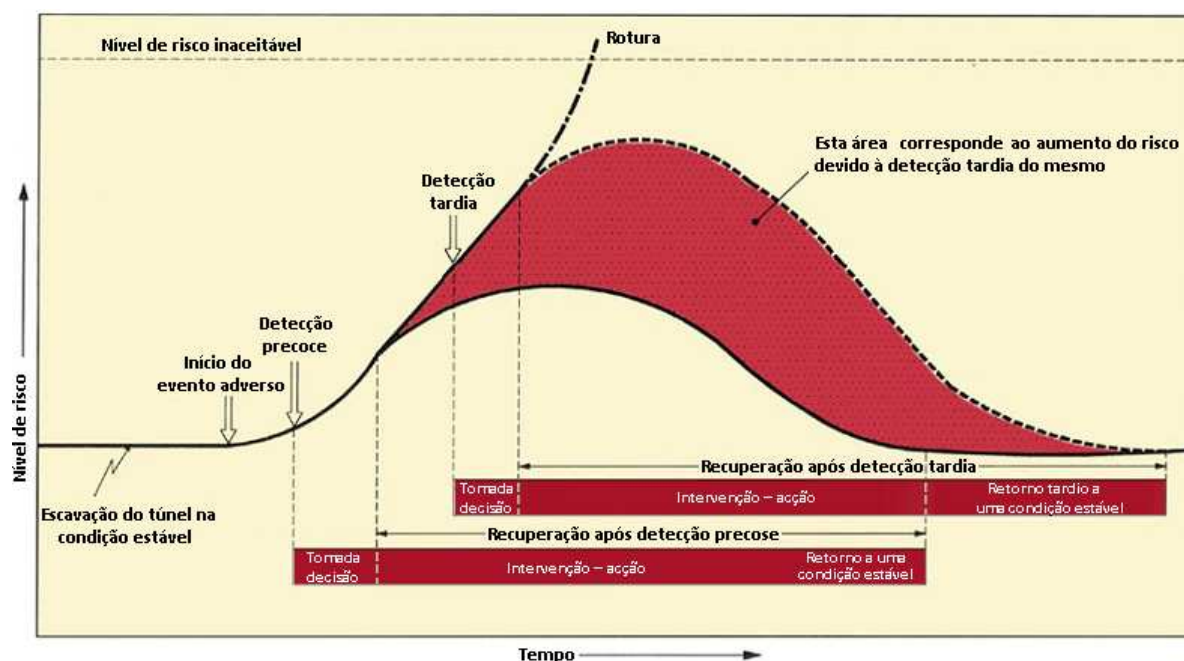


Figura 5.1. Modelo “detecção do risco - acção correctiva” (HSE, 1996 in Neto & Kochen, 2000, adaptado).

Por outro lado é de notar que uma acção excessivamente cautelosa pode levar ao desperdício de recursos, talvez sob a forma de projectos muito conservadores, ou de propostas que perdem um contrato, devido às elevadas estimativas de risco que apresentam. Assim, é importante equilibrar o risco, *e.g.*, através das análises de risco.

Ao longo dos anos, tem sido estabelecida uma lógica para lidar com os riscos que não podem ser reduzidos, *a priori*, a um nível aceitavelmente baixo (Figura 5.2). Esta lógica é baseada no MO de acordo com o EC7.

Schubert (2004) considera que esta abordagem é adequada para projectos críticos, tais como túneis de baixa cobertura, ao invés de túneis profundos. Nos túneis profundos, devido ao maior desconhecimento do terreno, o MO é tradicionalmente aplicado numa abordagem muito mais geral, com exigências menos rigorosas. O principal problema reside no facto do risco permanecer desconhecido até se dar a sua manifestação; desta forma, pode não ser gerido através de um plano adequado.

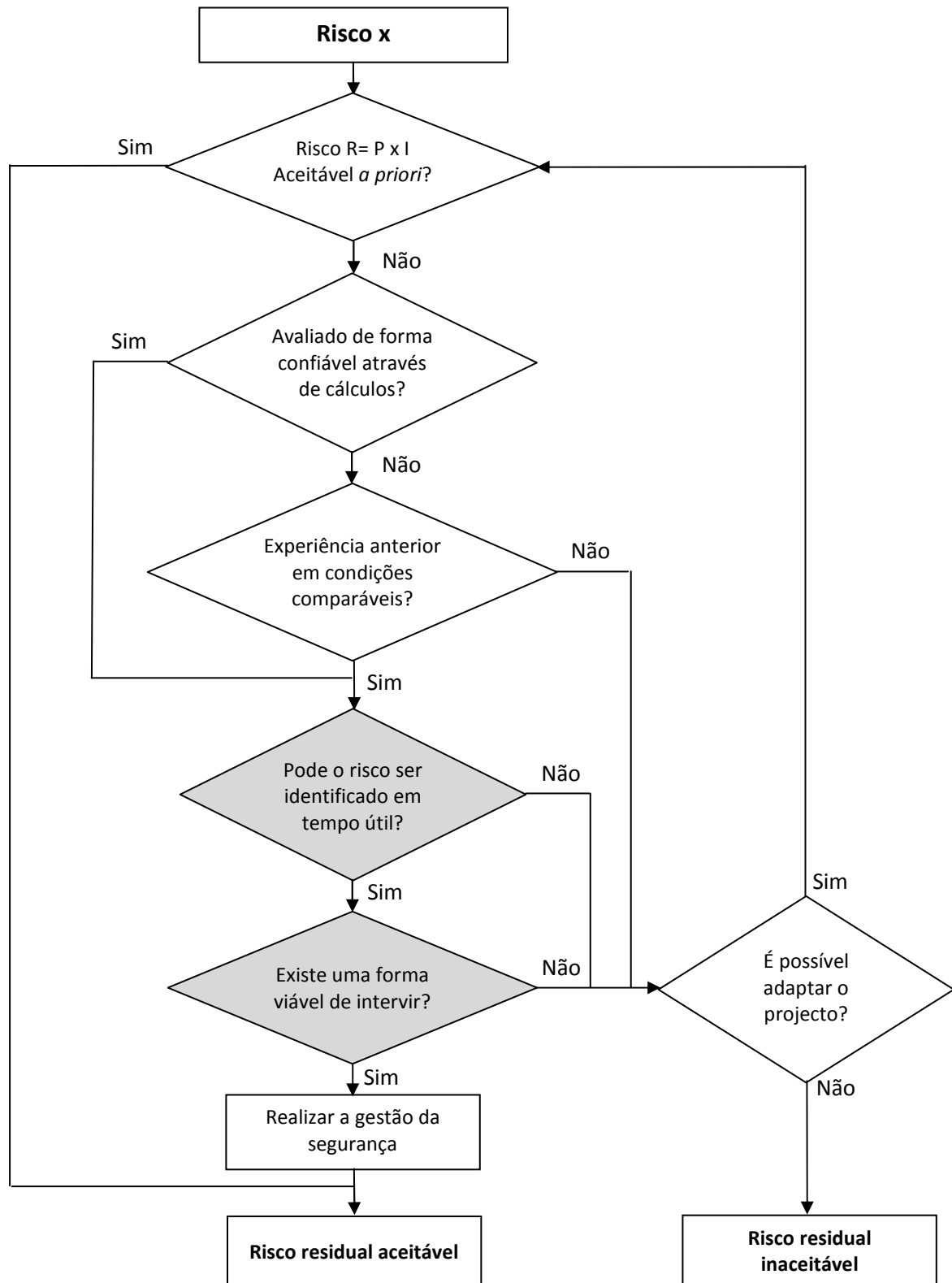


Figura 5.2. Lógica de lidar com o risco residual, não evitável *a priori* (Schubert, 2004, adaptado).

As etapas no fluxograma da Figura 5.2 são as seguintes:

- ✓ Inicialmente, o risco deve ser avaliado de forma confiável através de cálculos ou experiência anterior em condições comparáveis. Se qualquer uma destas condições

foi respondida positivamente, então pode ser aplicado o MO do EC7. Caso contrário, o projecto precisa de ser alterado;

- ✓ A parte observacional (cinzento) tem dois elementos críticos:
  - Pode o risco ser identificado em tempo útil, permitindo uma reacção adequada?
  - São os métodos disponíveis, viáveis para contrariar a evolução desfavorável?
- ✓ Ambos os elementos precisam de ser respondidos positivamente para que o MO seja implementado, nomeadamente em túneis com baixo recobrimento. Se um dos dois critérios for negativo, o projecto necessita de ser alterado.

### 5.3.1 Método observacional (MO)

Segundo Patel *et al.* (2007), pode-se distinguir monitorização de dois tipos: a utilizada num projecto tradicional e a baseada no MO.

Os projectos tradicionais de Engenharia do terreno são geralmente baseados num projecto, único, robusto e completamente desenvolvido, onde não existe *a priori* intenção de o alterar durante a construção. A instrumentação e monitorização podem ser utilizadas para verificar se as previsões iniciais são válidas e fornecer confiança a terceiros (*e.g.*, proprietários de edifícios adjacentes, à zona a afectar pela escavação). No entanto desempenham um papel muito passivo. Num recente trabalho sobre MO (CIRIA, 1999 *in op. cit.*), esta abordagem de projecto tradicional é chamada de “projecto pré-definido”.

Pelo contrário, no MO a monitorização desempenha um papel muito activo no projecto e construção, permitindo que as modificações que se venham a revelar necessárias sejam realizadas dentro de um quadro contratual acordado, que envolve todas as partes (*i.e.*, Dono de Obra, Projectista e Empreiteiro). As estruturas executadas com base nos métodos de projecto tradicionais são consideravelmente mais caras quando comparadas com aquelas que utilizam o MO (Lossmann & Motycka, 2007). O MO é mais exigente que o projecto tradicional, uma vez que assume como ponto de partida as incertezas das reais condições dos terrenos e conduz a um maior rigor, em termos de previsão de cenários e do comportamento da obra, bem como ao planeamento prévio com vista a uma eficaz capacidade de intervenção.

As diferenças entre as duas abordagens de projecto são resumidas no Quadro 5.2.

**Quadro 5.2. Comparação entre projecto pré-definido e o MO (Patel *et al.*, 2007, adaptado).**

<b>Projecto pré-definido</b>	<b>Método observacional</b>
Trabalhos permanentes	Trabalhos temporários
Um conjunto de parâmetros	Dois conjuntos de parâmetros
Um projecto / previsões	Dois projectos / previsões
Definição do método construtivo	Métodos integrados de projecto e de construção
Método pré-definido de trabalhos temporários pelo Empreiteiro	Métodos são relacionados com os níveis de alerta
Validação das previsões não excedidas pela monitorização	Sistema de monitorização abrangente e robusto
Se as verificações forem ultrapassadas, considerar: ✓ Melhor maneira de adoptar o projecto; ✓ Redefinir o projecto pré-definido, reavaliando as incertezas geotécnicas no terreno.	Processo de revisão e modificação: ✓ Plano de contingência; ✓ Plano de melhoramento.
Plano de emergência	Plano de emergência

O MO é utilizado, essencialmente, para obras onde se verifiquem grandes incertezas do terreno, como é o caso dos túneis, e de cujo colapso durante a fase de construção possam advir consequências muito graves. Nicholson *et al.* (1999 in TGN25, 2009) descrevem o MO como um processo de gestão, contínuo e integrado, de controlo da construção, de monitorização e revisão, que permite a incorporação de alterações ao projecto, previamente definidas, durante ou após a construção, de acordo com o apropriado, às condições reais existentes. Essas alterações (*e.g.*, alteração da velocidade de avanço ou de construção, métodos de tratamento do terreno, etc.) devem ser definidas não só no sentido de prevenir ocorrências desfavoráveis, mas também no sentido de otimizar as necessidades com as consequentes reduções de custos e prazos, sem comprometer a segurança.

O MO revela-se extremamente útil na identificação de perigos potenciais e na contenção de risco, uma vez que a sua aplicação exige a compreensão completa da sequência construtiva e dos diversos mecanismos de rotura potencial. A sua necessidade resulta exactamente da análise e interpretação de informação, que permitiu estabelecer cenários geotécnicos com determinada probabilidade de ocorrência, cuja materialização, com todas as consequências inerentes, importa conhecer (Flor & Roxo, 2010).

Em situações em que o comportamento real se afaste significativamente do projectado, torna-se necessário alterar o método construtivo e/ou incrementar o nível de suporte, com o consequente acréscimo de encargos. A Figura 5.3 retrata bem a incorporação do MO nos projectos de túneis.

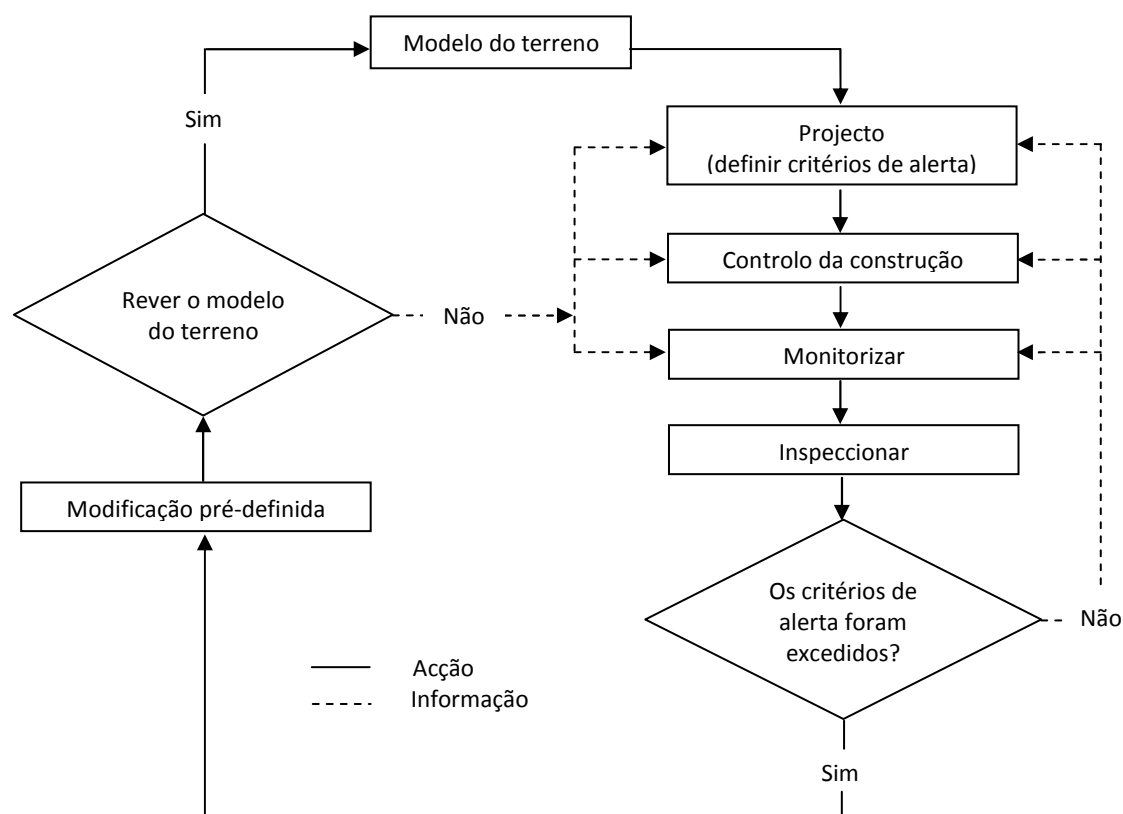


Figura 5.3. Sistema utilizado pelo MO num túnel (CE 439, 2004, adaptado).

Para o MO ser efectivo deve haver estreita colaboração com o Projectista e estarem implementados mecanismos de comunicação eficazes, que potenciem a tomada de decisão em tempo útil. Por outro lado, o MO não deverá ser utilizado se não houver tempo suficiente para implementar um plano de modificação ao projecto ou planos de emergência, *e.g.*, devido a um colapso frágil. Daí que seja necessária uma estreita ligação entre o projecto e a construção. Os modernos contratos do tipo Concepção - Construção são favoráveis no que toca a este ponto, com o projecto e a construção a serem da responsabilidade de uma única entidade. Essa parte pode beneficiar do método de observação ao reduzir os custos, dentro da segurança pré-estabelecida e normas de qualidade, por uma utilização inteligente do MO (Staveren, 2006).

O MO foi recentemente estipulado no EC 7 (CEN, 2004). Quando se utiliza o MO têm de ser satisfeitos, antes do início da construção, os quatro requisitos seguintes (*op. cit.*):

- ✓ Devem ser estabelecidos os limites do comportamento aceitável;
- ✓ Deve ser determinada a gama de variação dos comportamentos possíveis e demonstrar-se que existe uma probabilidade aceitável de que o comportamento real se situe dentro dos limites admissíveis;

- ✓ Deve ser elaborado um Plano de Observação com o objectivo de verificar se o comportamento real se situa dentro dos limites estabelecidos; isto deve ser tornado suficientemente claro o mais cedo pela observação, em intervalos suficientemente curtos, para que se torne possível a adopção atempada de medidas correctivas; o tempo de resposta dos equipamentos e a análise dos resultados devem ser suficientemente rápidos em relação à possível evolução do comportamento da obra;
- ✓ Deve estar previsto um plano de actuação a ser adoptado no caso de a observação revelar comportamentos fora dos limites aceitáveis.

O EC7 (CEN, 2004) refere ainda que, durante a construção, a observação deve ser efectuada tal como foi planeada e devem colocar-se, se tal for necessário, dispositivos adicionais ou proceder à substituição do equipamento. Os resultados da observação devem ser avaliados dentro de prazos adequados e, em caso de necessidade, deve ser posto em prática o plano de actuação previamente estabelecido. Desde modo, não só o nível de segurança actual da construção de um túnel pode ser melhorado, mas também uma confirmação formalmente correcta e suficiente do nível de segurança pode ser obtida (Figura 5.4).

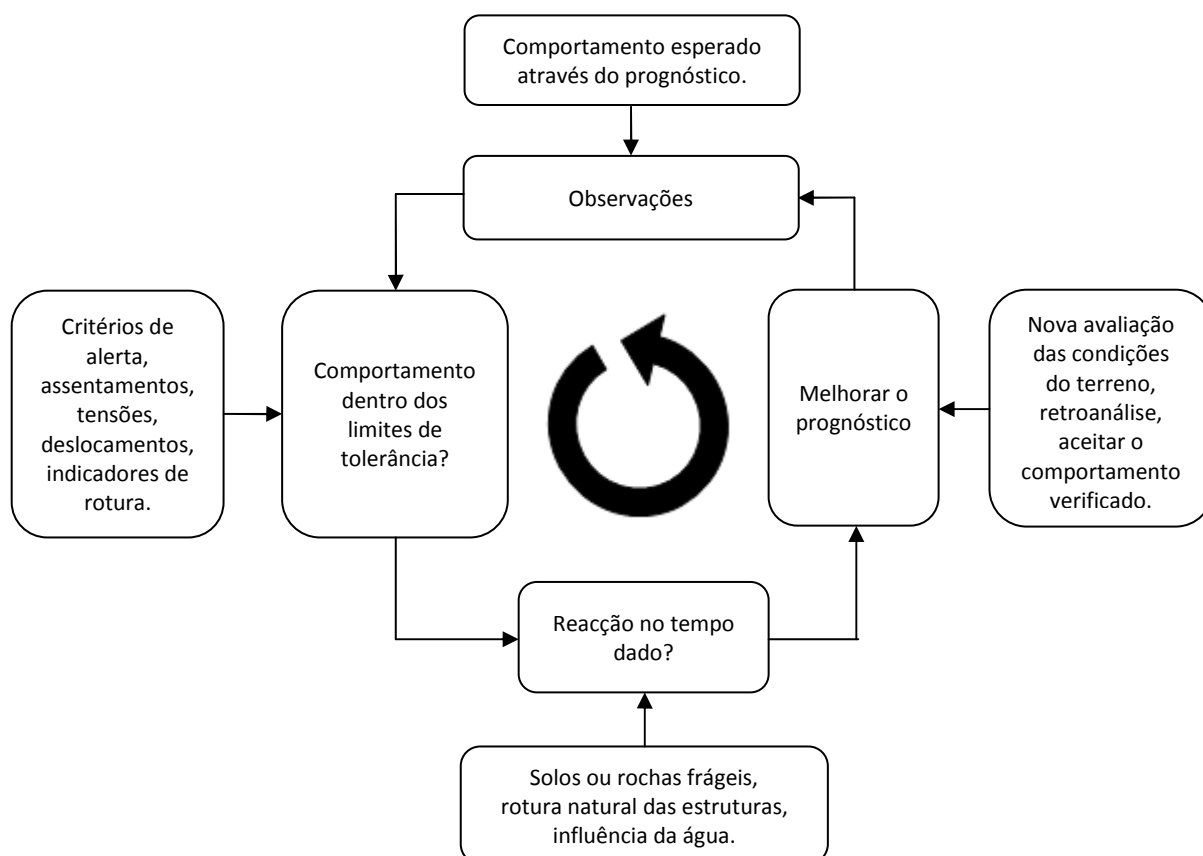


Figura 5.4. Gestão dos riscos durante a construção através do MO e de acordo com o EC7 (Schubert, 2004, adaptado).

O MO tem vários benefícios potenciais dos quais importa destacar (Ciria 185, 1999 *in* Patel *et al.*, 2007):

- ✓ Flexibilidade – se as alterações forem antecipadas;
- ✓ Alcança um valor - custo / tempo;
- ✓ Permite um maior controlo da segurança;
- ✓ Fornece uma maior motivação a equipa do projecto;
- ✓ Permite uma maior gestão e controlo da construção;
- ✓ Permite um maior controlo das incertezas do projecto;
- ✓ Promove trabalho de equipa entre Projectista e Empreiteiro.

As principais limitações do MO prendem-se sobretudo com (Patel *et al.*, 2007; Flor & Roxo, 2010; Staveren, 2006):

- ✓ A falta da identificação dos critérios e das soluções necessárias para o implementar;
- ✓ As dificuldades em obras onde o custo das medidas associadas aos diversos critérios de alerta estabelecidos não estavam contempladas no contrato;
- ✓ As obras executadas na modalidade de Concepção – Construção raramente possuem cláusulas relacionadas com condições imprevistas do terreno; assim, a eficácia do MO perde-se no meio e no tempo que a conflitualidade demora;
- ✓ No EC7 é feita referência aos “limites do comportamento aceitável”, mas não é definida a forma como estes podem ser fixados. O projecto é frequentemente baseado na utilização de “valores característicos” ou parâmetros geotécnicos moderadamente conservativos;
- ✓ O EC7 não prevê limites de referência definidos para estabelecer acções planeadas de emergência, através da verificação do comportamento;
- ✓ Não existe um quadro operacional descrito para gerir o MO dentro de um contrato, nem no âmbito da política nacional ou da organização do projecto;
- ✓ Uma ausência de um conjunto completo de cenários risco, porque estas situações têm de ser desenvolvidas e planeadas durante o projecto;
- ✓ Alguns mecanismos não podem ser medidos, mas sim só observados visualmente através de um Engenheiro experiente. Contudo, as observações humanas e as interpretações daí resultantes incorporam uma inerente subjectividade nas conclusões que serão tiradas a partir dos dados observados do terreno;

- ✓ Não funciona quando não estão definidas, atempadamente, as medidas de correcção/mitigação necessárias ou quando os planos de observação não são cumpridos ou quando estão mal estabelecidos.

Uma outra desvantagem característica do MO é a carga de trabalho relativamente grande e demorada para interpretar as observações feitas e reanalisar os seus prováveis efeitos sobre o projecto. No entanto, hoje em dia, a moderna e rentável tecnologia de informação e comunicação (TIC) reduz drasticamente esta desvantagem (Staveren, 2006). Grandes conjuntos de dados de monitorização do comportamento do terreno são simplesmente enviados para bases de dados através da *Internet*, para diversos lugares, em todo o mundo. Quase em tempo real, a interpretação e análise de retorno desses dados é possível com um aumento do número de utilização de *softwares*. Uma mensagem de SMS, pode agir como um alerta para um especialista em Geotecnia, que apenas tem de ligar o seu computador portátil à Internet, verificar o que poderá estar errado e agir em conformidade. Deste modo, os dados de controlo relacionados com o terreno podem ser facilmente acessíveis, a qualquer momento, em qualquer lugar e para quem está envolvido. Além disso, a evolução da moderna tecnologia dos sensores, produz abundantes tipos de sensores para múltiplos propósitos, alguns tão pequenos quanto uma cabeça de alfinete, e podem ser instalados no terreno ou simplesmente embebidos no betão. Também a tecnologia de detecção remota e imagens de satélite tornaram-se cada vez mais disponíveis, e a um baixo custo. A

Figura 5.5 resume esta evolução favorável e as tecnologias para a aplicação do MO, donde estão incluídos a gestão do risco geotécnico, os recentes contratos Concepção - Construção e a antecipação dos possíveis cenários de rotura, referidos ao longo do trabalho.

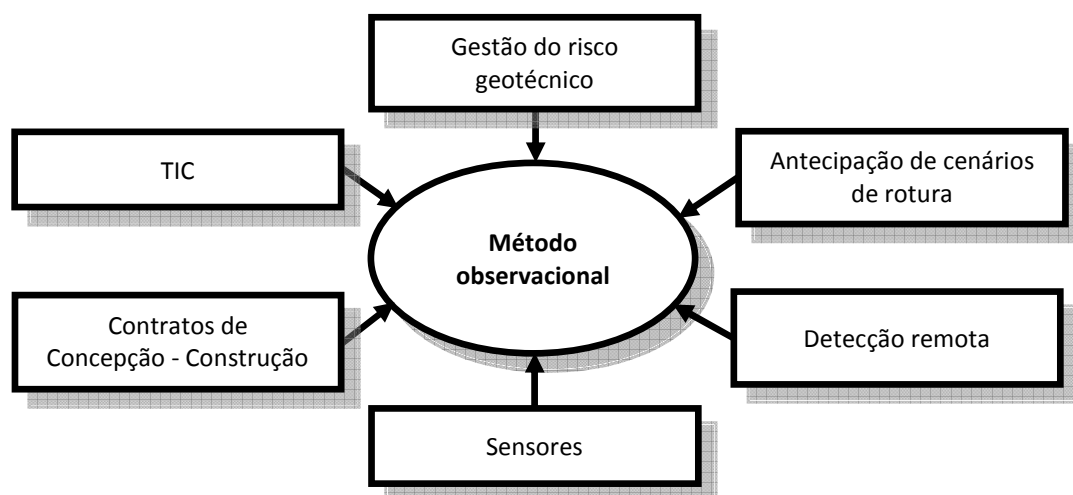


Figura 5.5. Desenvolvimento e tecnologias para a revitalização do MO (Staveren, 2006, adaptado).



Em suma, a aplicação do MO dentro de um quadro de gestão de risco proporciona rentabilizar a remediação do risco, para além de encontrar oportunidades, *i.e.*, um comportamento do terreno melhor do que o esperado revelado durante a construção (*e.g.*, necessária menor quantidade de suporte relativamente ao previsto).

### **5.3.2 Observação, registo e comunicação**

Como referido, a observação, engloba as actividades de monitorização e inspecções visuais. Esta é uma ferramenta útil quando os resultados são interpretados a tempo e disponibilizados quer ao Projectista, quer ao Empreiteiro, e quando está previsto um mecanismo de ajuste dos métodos construtivos ou do dimensionamento com base nos seus resultados. É desta maneira que os riscos previamente identificados, avaliados e mitigados podem ser controlados.

Durante a construção e até à recepção da obra existe a designada observação de curto prazo, para avaliar a conformidade entre os comportamentos modelados e os comportamentos reais das estruturas. Nesta fase, a observação reveste-se de múltiplas funções úteis que, em particular, garantem ao Dono de Obra, o controlo sobre o bom desenvolvimento dos trabalhos, o efeito sobre as zonas críticas das diferentes estruturas que se vão materializando ao longo das várias fases de construção, e a disponibilização de informações para as alterações ao projecto. Quando os processos construtivos são implementados em obra por etapas, a observação poderá fornecer informações interessantes sobre a eficácia das várias etapas, no tempo e no espaço (*e.g.*, abertura de túneis por secções parciais ou múltiplas).

No contexto da gestão dos riscos geotécnicos, a observação, deve avaliar, de forma adequada, as condições de segurança, quer da estabilidade da frente, quer das edificações e instalações existentes na vizinhança, e intervir com medidas apropriadas, logo quem sejam detectadas condições anómalas ou perigosas. Além disso, deve determinar as causas dos movimentos do terreno, a sua magnitude e distribuição e o seu efeito, garantindo que, nomeadamente os assentamentos e distorções introduzidos pela escavação se situem dentro dos limites aceitáveis e definir o modelo de deformação do maciço permitindo a extrapolação do comportamento observado em secções já escavadas para outras ainda não escavadas (Amaral, 2006). No caso de túneis, os resultados da observação, obtidos nas fases

iniciais, são comparados com as estimativas mais prováveis e, caso sejam inferiores aos valores estimados, podem ser definidos novos valores dos parâmetros de cálculo, com vista a uma redefinição da sequência construtiva e consequente economia em termos de custos e prazos.

Segundo Negro & Queiroz (2010), a medição do desempenho de túneis depende do tipo de método/técnica de construção que está a ser empregue. Para um túnel construído em NATM, as principais razões para essa medição são (*op. cit.*):

- ✓ A avaliação da condição de estabilidade crítica do maciço (tratado ou não), antes da aplicação do sustimento, na face do túnel ou na frente ainda não escorada;
- ✓ A avaliação do impacto da construção do túnel no ambiente e potenciais danos nas estruturas e infra-estruturas vizinhas;
- ✓ A possibilidade de se realizar um projecto interactivo, em virtude do qual a instalação do sustimento ou o condicionamento do terreno podem ser otimizados, a velocidade de avanço do túnel ou ainda a possibilidade de retroanálises podem ser aumentadas.

Por outro lado, para um túnel construído com TBM, as razões comuns para a medição do desempenho do túnel são (Negro & Queiroz, *op. cit.*):

- ✓ A avaliação da eficiência do controlo da estabilidade da face;
- ✓ A avaliação da eficiência do preenchimento no extradorso do sustimento para controlo da perda de solo;
- ✓ A avaliação do impacto da construção do túnel no ambiente e dos danos potenciais em estruturas e infra-estruturas vizinhas;
- ✓ A possibilidade de projecto interactivo, em virtude da optimização da operação da tuneladora e dos parâmetros da lama ou da espuma.

Em geral, as actividades de observação estão muito condicionadas pelo factor económico. Normalmente, os custos da instrumentação incluem os de perfuração e tubagem de reserva instaladas, especificamente, para a instrumentação, o dos próprios instrumentos, incluindo a respectiva manutenção ao longo da obra, o custo da medição dos instrumentos, incluindo a mão-de-obra e as unidades de leitura, e os do pessoal para fiscalizar, verificar, analisar e informar os resultados da instrumentação. Alguns projectos recentes *Mass Rapid Transit (MRT)* em Hong Kong e Singapura têm demonstrado que o custo da instrumentação para as

obras de metropolitano varia entre 2% e 4% dos custos da construção (Maxwell & Naing, 2006). O custo da instalação representa cerca de metade deste valor, com o restante a ser atribuído ao pessoal. Contudo a observação permite, em muitos casos, mediante um ajustamento dos meios, otimizar, do ponto de vista económico, projectos delicados e controlar eficazmente o risco no decurso das diferentes fases da vida da obra, o que só por si a justifica plenamente (Caspurro & Gomes, 2000). Deste modo, pode existir uma poupança potencial decorrente do seu uso (Quadro 5.3). Um elemento-chave nessas economias é a economia de tempo e como resultado, menos paragens dos trabalhos.

**Quadro 5.3. Estimativa da poupança potencial, utilizando o MO (Maxwell & Naing, 2006, adaptado).**

Tipo de construção	Alteração no método	Poupança potencial estimada
Escavação aberta	Redução na secção das escoras.	3%
	Redução no espaçamento das escoras.	5%
	Redução do número de escoras.	7%
Estacas	Verificação da mobilização do atrito lateral e da distribuição axial de cargas em ensaios de estacas para reduzir o encastramento.	15%
NATM / explosivos	Medição das convergências do terreno para estimar os parâmetros de rigidez <i>in situ</i> e permitir que o revestimento seja eficiente.	3%
	Medição da pressão intersticial <i>in situ</i> .	-
	Medição das vibrações no terreno por aumento do peso da carga detonadora e comprimento dos furos.	-
TBM	Medição das vibrações na escavação mecanizada – aumento da carga horária de trabalho.	-
	Acréscimo na compreensão do modo de avanço <i>versus</i> descompressão da frente e assentamento com o avanço, permitindo um melhor planeamento dos trabalhos e em progresso consistente.	10%
	Planeamento efectivo das intervenções desenvolvidas.	-

Segundo Cunha & Fernandes (1980 *in* Bastos, 1998), o estabelecimento de um Plano de Observação apropriado deve atender aos seguintes aspectos:

- ✓ Natureza, tipo e localização da obra: a natureza da obra influencia o tipo e robustez dos equipamentos, que poderão ter de operar à distância e por longos períodos; o tipo de obra e os métodos construtivos condicionam os equipamentos, que se deverão adaptar ao método de suporte, espaço disponível, etc.; a localização da obra, relativamente à profundidade e ao meio em que se insere (urbano, rural, etc.), pode induzir concentração de sistemas de controlo superficiais e a instalação de instrumentação ao nível do eixo do túnel a partir da superfície;

- ✓ Características geotécnicas: a litologia, a hidrogeologia, o grau de alteração, os acidentes tectónicos, a fracturação, entre outros, condicionam a malha de observação, o tipo de instrumentação e a frequência das leituras;
- ✓ Métodos construtivos e ritmo da construção: o plano de observação estabelecido em fase de projecto permite ao Empreiteiro a sua inclusão no planeamento geral dos trabalhos, minimizando os atrasos na construção.

A colocação de equipamentos de monitorização para medição de deformações e níveis piezométricos antes do início da escavação, que permanecem em actividade no decorrer da obra, é uma metodologia eficaz na caracterização da situação de referência e do seu evoluir ao longo da construção. No Quadro 5.4 estão discriminadas as medições e equipamentos mais comuns numa obra subterrânea, e tecidas algumas observações.

**Quadro 5.4. Equipamentos de instrumentação e sua função (Bastos, 1998; Amaral, 2006; ITA, 2009, adaptado).**

Medição	Equipamentos	Observações
Movimentos verticais	Métodos topográficos (réguas, marcas superficiais e profundas, <i>bench marks</i> , e alvos topográficos); fissurómetros; clinómetros; métodos fotogramétricos; equipamentos GPS com comunicação por satélite; técnicas de laser; extensómetros de barras e de fio de invar em secções de controlo; técnica dos electrónveis.	À superfície permite avaliar os movimentos imediatamente adjacentes ao túnel, de modo a que possam ser correlacionados com os procedimentos construtivos e em estruturas vizinhas (edifícios, estradas, etc.) medição da deformação da estrutura devido à abertura do túnel, monitorizar a abertura de fendas ou medir os assentamentos da estrutura; também são feitas medições em profundidade.
Movimentos horizontais	Inclinómetros em secções de controlo; meios topográficos ou fotogramétricos (iguais aos aplicados na determinação dos assentamentos superficiais); convergenciómetros; electrónveis.	Medições dos deslocamentos horizontais em profundidade; medição de convergências no túnel com equipamentos de precisão, entre pontos na parede ou no suporte das aberturas são as mais realizadas para verificar o comportamento da obra, quer a curto quer a longo prazo;
Tensões instaladas no suporte	Células de pressão total; extensómetros eléctricos ou extensómetros de corda vibrante.	Caracterizar as respostas estruturais para quantificação das suas condições de segurança e a confrontação com as soluções analíticas ou numéricas estabelecidas;
Pressões transmitidas pelo terreno	Células de pressão total semelhantes às usadas na determinação dos esforços no suporte instaladas no interior do sustimento.	Medição da pressão transmitida pelo maciço para quantificar a acção solicitante deste sobre o suporte para verificação das hipóteses de cálculo;
Níveis piezométricos	Tubos piezométricos instalados em furos verticais desde a superfície; piezómetros hidráulicos, de corda vibrante, pneumáticos ou de Casagrande, instalados em furos de sondagem a partir do intradorso do suporte do túnel.	Nas camadas permeáveis ao longo do traçado do túnel; monitorizar o caudal subterrâneo e regime de pressões intersticiais; efeitos de operações de rebaixamento no nível freático; eficácia das medidas de controlo da percolação; processo de erosão interna; composição química da água do terreno; potencial de corrosão; medição das pressões hidrostáticas exercidas pela água sobre suportes impermeáveis; controlo do afluxo de água ao túnel.
Complementares	Vibrómetros; sismógrafos; sensores de temperatura e humidade.	Medições sísmicas e acústicas, importante quando o processo construtivo requer o uso de explosivos para a abertura do túnel.

Como se verifica, os principais equipamentos usualmente utilizados na observação de túneis incluem extensómetros, inclinómetros, marcas topográficas de precisão, células de pressão e convergenciómetros. Em geral, a monitorização mais comum é a medição de deslocamentos, *e.g.*, a convergência do túnel ou dos assentamentos superficiais do terreno. Os deslocamentos têm a vantagem de, num sentido físico, representarem quantidades integradas não sendo, basicamente, sujeitos a efeitos locais. Tensões, deformações ou alterações na curvatura, por outro lado, são quantidades diferenciais, cuja validade é limitada às regiões locais (efeito de escala). Portanto, a observação em vários pontos sucessivos será necessária para obter uma distribuição numa área suficientemente grande. Em alguns casos, como na construção subterrânea em rochas expansivas ou na presença de condições difíceis de águas subterrâneas, os valores das tensões de contacto ou das pressões dessas águas podem ser uma medida muito relevante e sensível. A medição dos deslocamentos superficiais, principalmente no caso de túneis pouco profundos, reveste-se de especial importância, uma vez que permite avaliar a estabilidade, não só da frente de escavação, como também das edificações e infra-estruturas circundantes.

Com a selecção dos parâmetros a monitorizar, os tipos de instrumentos são também definidos. A resolução do instrumento e o campo de medida necessários, são fornecidos pela previsão máxima da magnitude da alteração a avaliar. No entanto, a exactidão não depende somente da resolução, mas também do princípio de medição utilizado pelo instrumento. Além disso, os instrumentos com um elevado campo de medida muitas vezes têm uma menor resolução e exactidão. Por fim, na escolha do instrumento, devem ser considerados a disponibilidade, durabilidade, manutenção, requisitos de calibração e custos (ITA, 2009).

A fim de definir a localização definitiva dos instrumentos devem identificar-se as zonas de maior preocupação e áreas críticas (*i.e.*, mais sensíveis ou onde tenham sido detectadas anomalias que careçam de estudos detalhados) em que um maior número de instrumentos pode ser necessário para obter resultados significativos. Em obras lineares, como é o caso dos túneis, as secções de observação devem ser seleccionadas com base no perfil geológico, permitindo assim efectuar um controlo do comportamento da obra nas distintas formações interessadas e em zonas singulares, tais como falhas ou outros acidentes geológicos importantes. Conjuntamente com a análise do perfil geológico, deve-se procurar identificar

os pontos representativos do comportamento global da obra e, em seguida, definir quais os que são susceptíveis de se singularizar, tendo em conta que interessa observar as respostas da obra face às acções impostas e às propriedades dos materiais (Negro & Queiroz, 2010).

Usualmente, os instrumentos são agrupados em determinadas secções que, geralmente, se dividem em secções principais, onde o número de instrumentos e consequentemente de grandezas medidas é maior e, em secções secundárias, onde o seu número é menor. Nestas últimas, frequentemente, são medidas apenas convergências a partir das quais, e com o auxílio dos valores medidos nas secções principais, são obtidos, por extrapolação, outros resultados. A disposição e espaçamento entre as matrizes de instrumentação dependerão de factores tais como a estratigrafia, o nível de detalhe e grau de redundância exigido, bem como da localização do túnel em relação a estruturas existentes nas proximidades.

A exploração de um sistema de observação abrange a recolha de informação, resultante quer dos equipamentos quer de inspecções visuais, a compilação, o processamento, a análise e interpretação da informação obtida, a apresentação dos resultados e a verificação do funcionamento bem como a manutenção regular de todos os equipamentos (Amaral, 2006). O plano de recolha de dados inclui detalhes sobre a frequência das leituras, transmissão e armazenamento de dados. O tratamento da informação recolhida pelo sistema de observação da obra vem normalmente expressa em relatórios. Estes podem ser periódicos, específicos, gerais, de inspecções visuais ou especiais (Amaral, 2006).

Os resultados da observação devem ser apresentados de forma clara e completa, de modo a permitir evidenciar as incertezas, verificar os mecanismos que controlam o comportamento da obra e avaliar a sua normalidade. A partir dos resultados obtidos pela observação devem-se efectuar interpretações possibilitando a comparação das previsões efectuadas com os resultados obtidos, tendo sempre presente os níveis de alerta previamente definidos. Com base na informação recebida, é ainda possível efectuar uma análise da evolução dos valores obtidos ao longo do tempo em função do avanço da frente da escavação, estabelecer correlações entre os valores observados e as características da obra e respectiva envolvente e ajustar a frequência das leituras, dependendo, de factores como: as características do maciço e da própria estrutura subterrânea; distância à frente de escavação e comportamento evidenciado pelas secções instrumentadas, procedendo, quando necessário, ao reforço ou alteração do Plano de Observação.

Para tudo isto é necessário que as várias fases de observação das obras ao longo da sua vida útil envolvam uma equipa multidisciplinar (*i.e.*, geólogo e/ou um geotécnico e um especialista em observação) de forma a possibilitar uma interpretação aprofundada dos resultados (Caspurro & Gomes, 2000).

Em túneis e, de uma forma mais geral, nas obras geotécnicas, é necessário efectuar as medições com rapidez de modo a poder obter informação em tempo real, especialmente durante o período da construção. Assim, os sistemas automáticos de observação desempenham um papel importante nesta área, tendo em conta as condições difíceis de trabalho associadas à construção deste tipo de obras.

Um sistema de comunicação também deve ser colocado em prática para assegurar que, quando necessário, sejam implementadas, de forma eficaz, as acções de mitigação de risco. Sempre que os valores são atingidos ou for observada uma resposta anormal, devem ser tomadas, em tempo útil, acções correctivas ou de contingência pré-definidas. Devem estar previstos procedimentos para, quando tal não ponha em causa a gestão dos riscos, avaliar a oportunidade de reduzir a instrumentação e a frequência da monitorização. A comunicação de informações sobre os riscos e consulta com os participantes responsáveis por outras áreas de implementação do projecto, bem como os principais intervenientes, incluindo o público alvo, são processos de duas vias que devem ser realizados de forma pró-activa e continuar durante toda a duração da obra. Para tal o registo de riscos geotécnicos deve ser armazenado num ponto central para ser obtida uma visão geral de todo o projecto em termos de risco (TGN25, 2009).

### **5.3.3 Níveis de alerta e de alarme**

A compreensão, o mais completa possível, dos processos geotécnicos e da interacção terreno-estrutura é um elemento-chave para o estabelecimento de critérios realistas de alerta e alarme. As avançadas ferramentas de monitorização, avaliação e interpretação auxiliam no estabelecimento dos comportamentos esperados e verificam os valores obtidos sobre os critérios de alerta, previamente estabelecidos. Os intervalos de controlo devem ser suficientes para detectar, a tempo, qualquer evolução desfavorável, e a avaliação dos resultados deve ser suficientemente rápida em relação à possível evolução do sistema.

É comum nas especificações, estipular apenas as acções necessárias, nomeadamente quando os assentamentos de uma qualquer estrutura existente, atingirem uma certa magnitude, ou quando as vibrações de uma explosão excederem a velocidade de pico das partículas. No entanto, existem muitos outros parâmetros que podem merecer atenção. No interesse de uma boa gestão de riscos, é recomendado que os Projectistas responsáveis pelos programas de instrumentação e de monitorização incluam os parâmetros mais importantes dos valores limites especificados. O que se segue é uma lista parcial do que pode ser apropriado considerar na inclusão destas especificações (ITA, 2009):

- ✓ Profundidade a que nível freático deve ser rebaixado ou a profundidade que possa ser autorizado a ascender;
- ✓ Movimentos verticais admissíveis medidos por sensores localizados no terreno, a diferentes profundidades;
- ✓ Desvios laterais admissíveis em relação à vertical em pontos localizados ao longo de tubos inclinométricos sub-verticais;
- ✓ Deformações admissíveis do terreno ou revestimentos no túnel em construção;
- ✓ Assentamentos admissíveis individualmente, ou seja, para cada uma das estruturas existentes;
- ✓ Inclinações admissíveis das paredes para cada uma das estruturas existentes;
- ✓ Assentamentos diferenciais e distorções angulares admissíveis de estruturas existentes;
- ✓ Aumento permitido das distâncias entre os bordos de fissuras estruturais ou de juntas de dilatação;
- ✓ Aumento da carga admissível em escavações escoradas ou não apoiadas;
- ✓ Taxa de variação de alguma das situações acima referidas, além da magnitude absoluta.

Num processo de construção faseada, como num túnel pelo método NATM, a taxa de avanço da frente e a perda do controlo da frente, são componentes críticos na determinação de como os movimentos do terreno são controlados, no programa de “Detecção do risco – Acção correctiva”. A Figura 5.6 mostra que, quanto mais tarde o problema for detectado, maior o risco e mais tempo a estrutura permanece num estado de estabilidade reduzida (zona vermelha). Uma tomada de decisão tardia e respectiva recuperação, também teriam o mesmo efeito. Uma característica essencial do MO reside no uso de valores limite. Esses



valores são chamados de níveis de alerta e de alarme, que uma vez alcançados por uma qualquer alteração, implicam a tomada de acções. Estas acções poderão compreender alterações de projecto, acções de contingência ou acções de emergência. No caso dos túneis, os níveis de alerta geralmente são estabelecidos em termos de tendências de variação, para os quais se torna difícil estimar valores associados a estágios de escavação intermédios. Esses limites também podem ser resumidos em termos de restrições chave ao projecto (Maxwell & Naing, 2006):

- ✓ A tolerância das estruturas adjacentes: parar/alterar antes que se induzam danos na construção;
- ✓ Alguma proporção relativa da capacidade última: parar/alterar antes que a construção entre em rotura;
- ✓ Alguma proporção relativa das estimativas do projecto: parar/alterar quando o projecto aparentemente contenha erros.

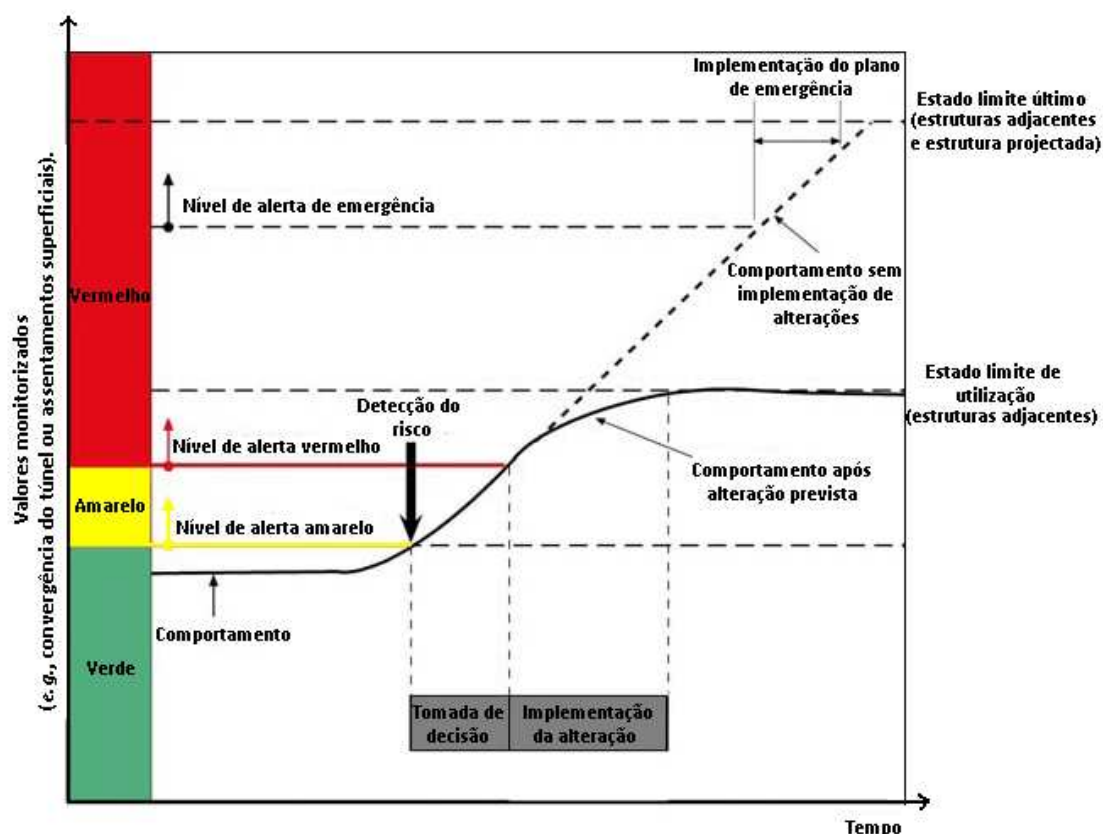


Figura 5.6. Exemplo de critérios de alerta para um túnel em NATM (CIRIA 185, 1999 *in* Patel *et al.*, 2007, adaptado).

O MO usa como que um sistema semafórico (Figura 5.6) com zonas de resposta verde, amarelo e vermelho. No caso real de um desvio no comportamento esperado, pode ser accionado um dos três níveis de alerta, dependendo da gravidade do desvio.

Aplica-se o nível de atenção (zona a verde), se os valores observados são inferiores ao nível de alerta amarelo, e quando o comportamento real, da construção é adequado e de acordo com o previsto, devendo neste caso, prosseguir-se com a construção. Este limite é estabelecido com base nas estimativas mais prováveis e na duração do período de tomada de decisão.

Quando o nível de alerta amarelo é excedido entra-se na zona amarela, onde ocorrem desvios significativos do comportamento esperado, mas com uma margem razoável de segurança contra a rotura. Nesta zona é recomendável aumentar a frequência das leituras, observar atentamente a qualidade da execução e analisar a respectiva evolução, com vista à tomada de decisões acerca da implementação de alterações de projecto ou de acções de contingência.

Quando a zona amarela é ultrapassada atinge-se o nível de alerta vermelho e respectiva zona vermelha, o alarme é então anunciado, e devem ser aplicados os procedimentos planeados de alteração de projecto ou de acções de contingência para assegurar que o estado limite de utilização não seja excedido. Este limite depende da evolução esperada para o cenário de rotura associado (*i.e.*, do desenvolvimento de deformações progressivas, com pouca margem de segurança, ou rotura local) e do tempo necessário para a intervenção prevista no projecto.

Posteriormente, o nível de alerta de emergência é aplicável, quando é alcançado um valor próximo da ocorrência de um estado limite último da estrutura projectada e são afectados terceiros (estruturas adjacentes).

As condições para a reposição do nível de alerta baseiam-se na estabilidade do túnel, ou quando os resultados da observação indicam que os objectos ou infra-estruturas não são influenciados, assim como quando as medidas de mitigação já provaram ser eficazes.

Dadas as incertezas associadas ao seu estabelecimento na fase de projecto, os limites de alerta não devem ser considerados como estáticos e imutáveis, devendo ser actualizados com base nos dados de observação recolhidos durante a construção (Caldeira, 2005).

## 5.4 REGISTO DE RISCOS (RR)

A ITIG (2006) recomenda a produção de um RR para a fase de construção e define o documento como: “Um registo que arquiva todos os riscos do projecto identificados na fase de construção e inclui os riscos identificados, pelo registo de riscos, do contrato inicial do

Dono de Obra, pelos responsáveis dos riscos e acções e medidas exigidas para reduzir o impacto dos riscos identificados nas obras de túneis”.

Os RR têm sido largamente utilizados como meio de documentar os riscos perceptíveis e a sua importância, e registar as acções promovidas para geri-los. Um registo é um potente modo de comunicação na partilha da informação entre várias organizações, ou partes da mesma organização, que trabalham num determinado projecto (Caldeira, 2005). Desta maneira trata-se de um meio compacto de registar os eventos que podem acontecer durante todas as fases da obra.

A utilização de um RR como uma ferramenta de gestão de projectos é algo que não pode ser alcançado com qualquer formato. O formato do RR deve ser suficientemente robusto e conter vários atributos chave para ser usado como tal. Deste modo, o registo deve ser estruturado de modo a incluir (Grasso *et al.*, 2007): as famílias dos perigos e, dentro de cada família, a lista de perigos e suas causas; a quantificação da sua probabilidade de ocorrência e as suas consequências e, portanto, do risco, a indicação dos riscos iniciais inaceitáveis, a identificação de uma estratégia específica para reduzir cada risco inicial, a quantificação dos riscos residuais através de uma reavaliação assumindo que as medidas de mitigação foram implementadas, permitindo desta forma manter o controlo sobre todos os esforços de mitigação e riscos residuais, caso subsistam. Os riscos residuais podem ser aceites pelo Dono de Obra, passados para o Empreiteiro, ou para as Seguradoras, como forma de mitigação adicional. Estes registos podem também conter a fase dos trabalhos em que as medidas mitigadoras devem ser adoptadas e por quem, os efeitos previstos que essas medidas vão criar e a entidade que se responsabiliza pelas consequências do evento de risco, se este se vier a concretizar. Além disso, é também uma ferramenta que possibilita a comparação dos riscos entre si.

As novas contribuições para o RR são a atribuição da responsabilidade pelo risco e especificações no projecto de quando é que o risco específico é provável de ocorrer. Desta forma, constitui uma ferramenta vital e activa, sujeita a modificações conforme o andamento dos trabalhos para atender a preocupações de segurança e de Engenharia. A equipa de gestão do risco deve decidir sobre a periodicidade da revisão do RR e respectiva entrega às partes envolvidas. Segundo Goodfellow & Headland (2009) um aspecto importante da gestão do risco é que, depois dos riscos, se possível, serem evitados, ou

atenuados para níveis tão baixos quanto razoavelmente possível (ALARP), os riscos residuais devem ser alocados no caderno de encargos. No entanto, o RR não deve ser um documento do contrato e não deve diminuir as especificações e as demais disposições do mesmo. Ele é um documento previsto para dar informações. O RR transferido para o Empreiteiro deve conter todos os perigos geotécnicos que dizem respeito ao projecto, e reter apenas os que são política ou comercialmente sensíveis e se referem ao planeamento e viabilidade do projecto. Não fazendo parte do contrato, o RR, previne confusões e evita incompatibilidades, antes de estas se tornarem base para uma eventual reclamação.

Os RR e as respectivas estratégias de gestão de risco, provavelmente, sofrem alterações à medida que o projecto amadurece e se desenvolvem novos riscos ou os riscos antecipados desaparecem. Assim, durante a construção, a actualização e revisão periódica do risco do projecto repete as tarefas incluídas no ciclo que compõem a gestão do risco. Um processo de monitorização e actualização bem-sucedido acompanha sistematicamente os riscos, conduz à identificação de novos riscos, e gere eficazmente a reserva de contingência (Ashley *et al.*, 2006). Esta é uma reserva de dinheiro ou tempo necessário acima do estimado, para reduzir o risco de derrapagens aos objectivos do projecto a um nível aceitável para a organização (*op. cit.*). O registo de riscos geotécnicos é, sem dúvida, uma ferramenta com elevados benefícios no controlo e redução do risco geotécnico durante a fase construtiva. Por outro lado, ao documentar todas as etapas de gestão do risco, poderá fornecer uma base a ser utilizada em projectos futuros semelhantes.

De seguida apresentam-se dois exemplos de registo de riscos.

O Quadro 5.5 (Yoo, 2006) é um exemplo de um excerto do registo de riscos geotécnicos, de um túnel da rede de alta de velocidade, na Coreia do Sul, *GB High-Speed Railroad 14-3*, de grande extensão, construído numa zona urbana e escavado com TBM-NATM, *i.e.*, primeiramente escavado com uma TBM de 4,5m de diâmetro (com o intuito de escavar um túnel piloto) e posteriormente alargamento com NATM. O risco geotécnico descrito pertence à Categoria 1 - Estabilidade do terreno, definida no projecto.

O Quadro 5.6 (Grasso, 2008), é um exemplo de um excerto do registo de riscos geotécnicos relacionados com o método construtivo (TBM – EPB), realizado durante a construção de um túnel da linha de alta velocidade, *Nodo di Bologna*, com 9,4 m de diâmetro, numa zona urbana da cidade de Bolonha, Itália.

Quadro 5.5. Excerto do registo de riscos geotécnicos para um túnel da rede de alta de velocidade Coreana, *GB High-Speed Railroad 14-3* (Yoo, 2006, adaptado).

Nº	Perigo	Nível de risco inicial			Medidas de mitigação (túnel piloto)	Medidas de mitigação (alargamento com NATM)	Nível de risco residual			Observações
		Verosimilhança	Consequência	Risco			Verosimilhança	Consequência	Risco	
1	Quedas do tecto e hasteais instáveis < 5 em maciço rochoso altamente meteorizado e diaclasado.	4	3	12	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cabeça de corte com face exterior lisa;</li> <li>✓ Recuar discos de corte para reduzir o risco da cabeça ficar encravada;</li> <li>✓ Sondagem em avanço;</li> <li>✓ Pré - injeções de caldas;</li> <li>✓ Instalar sustimento (betão projectado + pregagens) atrás da cabeça de corte sem atrasos;</li> <li>✓ Sustimento adicional e/ou em avanço (enfilagens).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Aplicar o modelo de suporte mais apropriado;</li> <li>✓ Sondagem em avanço;</li> <li>✓ Injeções em avanço a partir do túnel piloto;</li> <li>✓ Instalação do suporte sem atrasos;</li> <li>✓ Ajustar o comprimento de avanço e/ou a sequência de escavação;</li> <li>✓ Suporte adicional e/ou suporte em avanço (enfilagens);</li> <li>✓ Ajustar o plano de fogo.</li> </ul>	3	2	6	O reconhecimento das condições do terreno para o alargamento em NATM é fornecido pelo túnel piloto em TBM.

Quadro 5.6. Excerto de um registo de riscos geotécnicos de um túnel da linha de alta velocidade, *Nodo di Bologna*, associados ao método construtivo (Grasso, 2008, adaptado).

Actividade	Risco Nº	Perigo	Responsável	Causa	Comentários / Constrangimentos	Antes das medidas de controlo						Avaliação dos riscos residuais	Após as medidas de controlo						Nível de risco da acção				
						Verosimilhança	Constr.		Recep.		Exp.		Verosimilhança	Constr.		Recep.		Exp.		Perigos residuais	Responsável	Outras acções necessárias	
							Impacto	Risco	Impacto	Risco	Impacto	Risco		Impacto	Risco	Impacto	Risco	Impacto	Risco				
Geral	TG.01	Seleccção da TBM inadequada.	GT (Gestor técnico)	✓ TBM inadequada; ✓ Critério operacional inadequado.	Qualquer um dos riscos listados podem potencialmente ocorrer.	2	5	Alto	5	Alto	1	Baixo	✓ Procurar aconselhamento especializado; ✓ Seleccionar EPBM.	1	2	Médio	4	Médio	4	Médio	-	GT	-
Operações da TBM	TM.02	Perda de solo originando assentamentos superficiais.	GT	✓ Sobreescavação; ✓ Face insuficiente; ✓ Pressão; ✓ Cabeça inadequada; ✓ Velocidade.	--	3	5	Alto	4	Alto	1	Baixo	✓ Funcionamento em modo fechado; ✓ Verificação da pressão de injecção; ✓ Monitorização do consumo de calda e lamas.	1	5	Médio	4	Médio	1	Baixo	-	GT	Implementar plano de emergência.
Operações da TBM	TM.03	Pressão é insuficiente ou a pressão exercida pela EPBM origina assentamentos superficiais.	GT	✓ Inesperado; ✓ Resposta lenta do terreno; ✓ Condições de intercepção a alterar pelo operador.	--	3	5	Alto	3	Médio	1	Baixo	✓ Implementação remota; ✓ Monitorização dos parâmetros da TBM; ✓ Melhorar monitorização; ✓ Procedimentos e SIG; ✓ Procedimentos a definir no PAT; ✓ Pressão mínima, automática de bentonite.	1	5	Médio	3	Baixo	1	Baixo	-	GT	Implementar plano de emergência.

Constr. – Construção    Recep. - Recepção definitiva    Exp. – Exploração

## 5.5 PLANO DE AVANÇO DO TÚNEL (PAT)

O conceito de projecto interactivo foi introduzido pela primeira vez pela empresa Geodata em 2001, na Linha 1 do metro do Porto, aberta com TBM-EPB (Grasso *et al.*, 2002b, Chiriotti *et al.*, 2004 in Grasso *et al.*, 2008). Tal foi conseguido através do uso do PAT um documento vivo que fornece uma ligação dinâmica entre o projecto e a construção e facilita a gestão dos riscos residuais e que no fundo representa uma ferramenta para o seu controlo. Este conceito é fácil de implementar, tem um baixo custo e fornece um procedimento prático para que Projectista, Empreiteiro e Dono de Obra, actualizem continuamente os cenários de risco, os correspondentes planos de mitigação, e procedimentos construtivos.

O PAT é um documento de projecto detalhado, que é produzido (ou actualizado) durante o avanço do túnel e antes da escavação de um novo trecho de 200/500m. Resume os requisitos do projecto e da construção, de modo a garantir uma operação segura. Usado como uma abordagem multi-disciplinar, para identificar os riscos e mitigar os residuais através do conteúdo dos documentos iniciais do projecto, da recolha, análise e tratamento dos dados relativos às secções anteriormente escavadas, as condições geológicas e hidrogeológicas locais, a pesquisa recente da condição dos edifícios, e as informações sobre as interferências pré-existentes e, se for o caso, na entrada de dados novos. Esta informação é então utilizada para obter uma previsão melhorada do modelo de referência (Chiriotti *et al.*, 2004). A Figura 5.7 ilustra os princípios gerais do PAT.

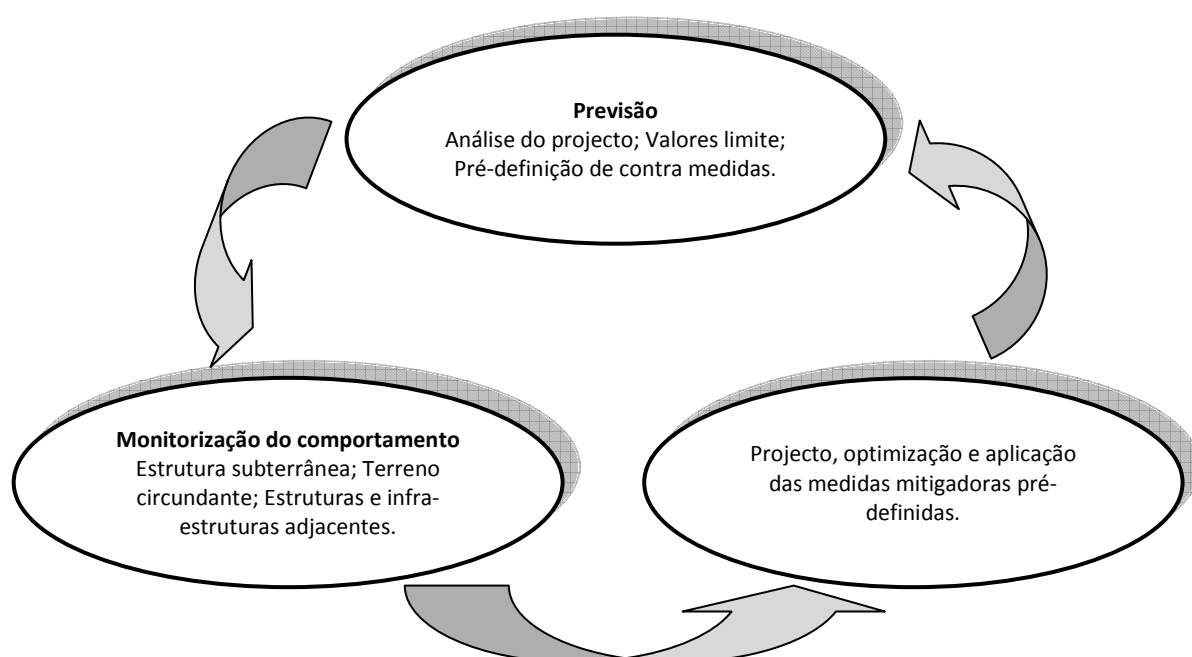


Figura 5.7. Os princípios do PAT (Grasso, 2008, adaptado).

O PAT facilita o trabalho dos operadores e técnicos no local e todas as informações relevantes são actualizadas e resumidas em documentos curtos e sintéticos, em vez de estarem dispersas em vários documentos do projecto. Dá-se sempre ao Empreiteiro os documentos do PAT, após o conteúdo ter sido discutido e acordado com o Dono de Obra. Neste ponto, o PAT torna-se um guia dinâmico para a construção do túnel. É usado para actualizar os parâmetros-chave com base num acompanhamento diário, em função dos dados da monitorização em tempo real, e serve como suporte para a tomada de decisões quando surgem situações anormais. A aplicação efectiva do PAT pode ser facilitada através da utilização de um controlo em tempo real, implementado numa plataforma SIG (Sistema de Informação Geográfica), acessível através da Internet, para que todas as informações sejam compartilhadas entre os vários intervenientes (Grasso *et al.*, 2008).

Um benefício que pode ser retirado da utilização das técnicas de controlo e actualização permanente do projecto-construção, através da implementação do PAT, é a estabilização activa do equilíbrio (Figura 5.8), também conhecido como instável, do MO (Grasso, 2008).

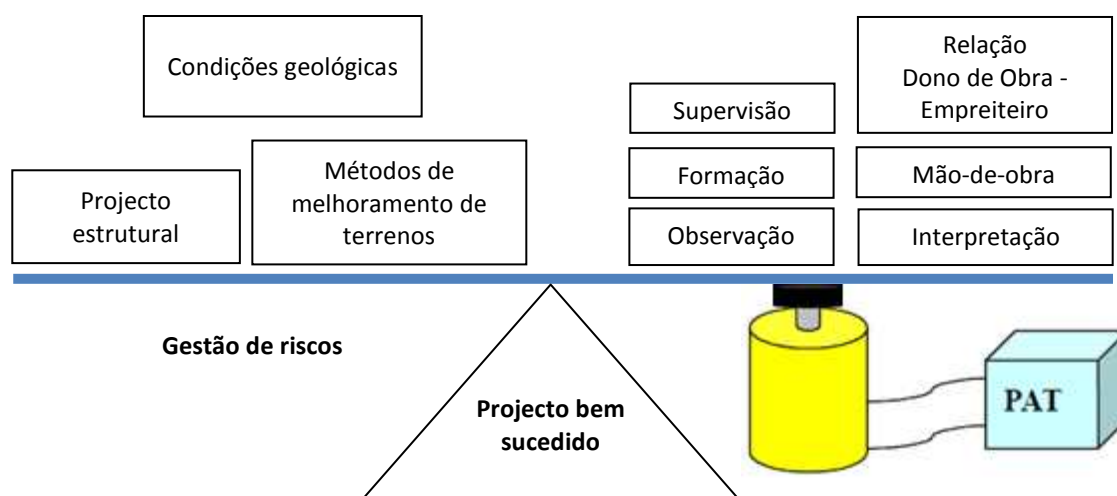


Figura 5.8. A função do PAT num projecto de um túnel (Grasso, 2008, adaptado).

Um exemplo bem sucedido da aplicação do PAT é, portanto, a Linha 1 do Metro do Porto. Neste, foi desenvolvido um plano de gestão de risco através de *workshops* especiais da equipa, com foco nos seguintes aspectos (Chiriotti *et al.*, 2004):

- ✓ Identificação dos eventos críticos nas várias fases da obra (estudos, projecto, construção e exploração), as suas causas e a entidade responsável;
- ✓ Avaliação da probabilidade de ocorrência dos eventos e o seu impacto sobre a segurança durante a construção (para os operadores e público), custo e tempo;

- ✓ Avaliação do risco como a combinação da probabilidade e do impacto;
- ✓ Priorização dos riscos em termos de mitigação e aceitabilidade;
- ✓ Definição das medidas de controlo mais adequadas, para reduzir o risco;
- ✓ Nova avaliação de risco, após aplicação dessas medidas;
- ✓ Definição das contramedidas para mitigar ou gerir o risco residual.

No caso do Metro do Porto, os principais riscos geotécnicos identificados prenderam-se sobretudo com a heterogeneidade do maciço rochoso, a presença de solo residual com estruturas metaestáveis sensíveis ao gradiente hidráulico, e com o comportamento frágil do maciço rochoso.

O PGR estabelecido continha um PAT, aplicado a trechos do túnel com comprimento de 200m até 1000m, e no qual foram incluídos os seguintes documentos (Grasso *et al.*, 2008):

- ✓ Relatório sobre a campanha de prospecção e a sua interpretação;
- ✓ Relatório sobre os riscos de assentamento dos edifícios;
- ✓ Relatório e desenhos sobre o controlo e monitorização de estruturas subterrâneas e de edifícios à superfície;
- ✓ Relatório sobre a avaliação dos parâmetros de funcionamento da TBM;
- ✓ Perfil geotécnico com indicação dos parâmetros de funcionamento da TBM.

Até ao final de cada trecho, a experiência adquirida foi resumida em documentos de análise específicos que contribuíram para otimizar os trechos seguintes. Por isso, este foi considerado um processo de melhoria contínua. Além das informações “tradicionais” sobre o projecto, tais como avaliações geológicas, cálculos estruturais, etc., adquiriram-se um conjunto específico de parâmetros de funcionamento da TBM (*op. cit.*): pressão na frente, densidade aparente do material na câmara, peso do material extraído em cada anel, pressão e volume das injeções de preenchimento do espaço anelar, e pressão e volume da bentonite adicionada. A síntese destes parâmetros resulta na designada “folha de escavação”. Em tempo real e com a análise das actividades, as folhas de escavação foram continuamente actualizadas com base nas condições que realmente iam sendo encontradas. A execução e actualização contínua do PAT demonstraram que esta é uma ferramenta muito eficaz, porque as condições geológicas e parâmetros de projecto da TBM são apresentados com antecedência, juntamente com a instrumentação e requisitos de controlo.



## 6 CASO DE ESTUDO HIPOTÉTICO

Conforme proposto, neste capítulo será apresentado um caso particular de aplicação de uma gestão do risco geotécnico durante a fase de construção de um túnel. A gestão eficaz do risco durante a execução dos trabalhos, só seria possível com recurso ao respectivo projecto de execução, em função dos dados obtidos durante esta fase e com a observação e o acompanhamento real da obra.

Contudo, devido à fase precoce em que se encontram os processos nacionais de gestão do risco geotécnico em túneis e ao panorama actual no que respeita a obras em curso com este tipo de abordagem, não seria possível em tempo útil a aplicação de uma metodologia a um caso real. Tendo em conta isso, implementou-se uma metodologia de gestão do risco, baseada nos capítulos anteriormente apresentados e com as devidas adaptações a um caso de estudo hipotético, num túnel sob determinadas condições que serão descritas no subcapítulo 6.2.

Assim sendo, toda a descrição do túnel foi baseada em estudos geológico – geotécnicos já realizados para túneis hidráulicos existentes em terrenos paleozóicos xisto – grauváquicos. A opção, túnel hidráulico, deveu-se sobretudo, ao diâmetro menor que estes muitas vezes apresentam em relação aos rodo e ferroviários, permitindo eventualmente conter menos problemas na sua construção, por sua vez, verificou-se que obras desta índole encontram-se maioritariamente em terrenos do tipo acima mencionado.

O contrato para a obra é do tipo Concepção – Concurso – Construção, uma vez que este permite uma gerência mais eficaz, por parte do Dono da Obra, da gestão do risco que está a ser realizada.

Pretende-se, que o túnel seja um exemplo simplista, para que os processos de gestão possam ser correctamente executados e compreendidos, com o intuito de serem implementados em futuras obras de maior complexidade. Uma vez que não foi possível acompanhar um caso real de obra, preconiza-se que os quadros apresentados ao longo do presente capítulo referentes às diferentes etapas de gestão do risco constituam um modelo tipo a aplicar na fase de construção da mesma. Nos capítulos que se seguem apresenta-se uma proposta metodológica de gestão e, seguidamente, são implementadas as etapas que lhe estão intrínsecas, identificação, avaliação (análise e apreciação), mitigação, observação,

controlo e revisão e por fim a comunicação do risco, onde serão tecidas algumas recomendações sobre a disponibilização das informações a todas as partes intervenientes, através do RR.

## 6.1 METODOLOGIA DE GESTÃO

Para a gestão do risco geotécnico, deve ser implementada, a metodologia ilustrada na Figura 6.1 proposta no âmbito da dissertação, e como já referido, baseada nos métodos e etapas descritos nos capítulos anteriores. Esta deverá ser adaptada, especificamente, para cada projecto, em função das características e condições em que se encontra o túnel. A seguir efectua-se uma descrição da metodologia a aplicar.

A descrição da obra, numa perspectiva de análise de riscos, antecederá a identificação dos mesmos. Esta é designada de *definição do contexto* e envolverá:

- ✓ A descrição da obra a executar, numa perspectiva de conjunto, e privilegiando os aspectos relativos à identificação dos riscos;
- ✓ A descrição dos métodos e técnicas a utilizar na execução.

As cinco etapas que caracterizarão a aplicação da metodologia a adoptar para a obra em causa são as seguintes:

Etapas 1: a *identificação dos perigos* geotécnicos que possam afectar pessoas ou causar perdas materiais, directas ou indirectas, caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Sistematizar, para a obra, os perigos identificados no projecto e os que, no mesmo, são também considerados plausíveis caso se verifiquem determinadas condições;
- ✓ Identificar outros perigos para além dos referenciados no projecto, designadamente os associados aos métodos e técnicas construtivas propostas e os identificados a partir das novas informações obtidas durante a execução dos trabalhos; tanto este, como o ponto anterior, podem ser verificados através de listas de verificação, já existentes, desenvolvidas em projectos similares ou criadas especificamente para o projecto em causa;
- ✓ Observar o comportamento da obra; execução de reconhecimentos complementares.

**Etapa 2:** a *avaliação dos riscos* subdivide-se em duas subetapas:

**2.1** *Análise do risco* caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Analisar qualitativamente a verosimilhança da ocorrência de cada risco (com base em pareceres de especialistas) e as consequências (em termos de acidentes pessoais, custos e prazos) associadas à sua eventual materialização;
- ✓ Calcular/estimar o “valor” do risco;
- ✓ Reanalisar os riscos após a aplicação das medidas mitigadoras e de controlo e observação.

**2.2** *Apreciação do risco* caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Priorizar os riscos calculados através da sua comparação, com os critérios de aceitabilidade/tolerabilidade;
- ✓ Ordenar as actividades orientadas para o tratamento dos riscos tendo em conta as suas prioridades;
- ✓ Reapreciar os riscos após a aplicação das medidas mitigadoras e de controlo e observação para verificar se estes foram efectivamente reduzidos, ou não, para níveis aceitáveis/toleráveis.

**Etapa 3:** a *mitigação do risco* subdivide-se em duas subetapas:

**3.1** *Estratégia para tratar o risco* (estudo/proposta das medidas de mitigação e de controlo e observação dos riscos) caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Evitar os riscos, quando viável;
- ✓ Caso contrário, estudo e selecção das medidas a empreender adoptando, em princípio, a seguinte ordem de preferência:
  - Reduzir a verosimilhança de ocorrência dos perigos;
  - Reduzir as consequências da sua eventual materialização.

**3.2** *Mitigação do risco* (implementação das medidas de mitigação e de controlo e observação) caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Implementar as medidas preconizadas em 3.1, tendo em conta que elas não devem originar novos perigos;
- ✓ Implementar, em face da relação benefício/custo das medidas passíveis de proporcionar aqueles desideratos, as medidas de mitigação e de controlo e observação adequadas.

**Etapas 4:** a *observação, controlo e revisão do risco* caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Avaliar o modo como as medidas preconizadas foram efectivamente implementadas (observação da eficácia das medidas mitigadoras), tendo em conta o preconizado em 3.2;
- ✓ Avaliar a adequação das medidas (controlo da eficácia das medidas mitigadoras, com eventual intervenção);
- ✓ Avaliar a eventual criação de novos perigos em resultado das medidas implementadas (revisão e actualização).

**Etapas 5:** a *Comunicação do risco* caracteriza-se essencialmente por:

- ✓ Elaborar e actualizar permanentemente o *RR* no decurso dos trabalhos da gestão do risco;
- ✓ Comunicar a todas as entidades envolvidas no processo, de acordo com os esquemas previamente estabelecidos, os resultados da gestão dos riscos, designadamente os que se referem à forma como os riscos foram geridos, à identificação de novos riscos e à sua severidade relativa.

O objectivo primordial da metodologia a adoptar consiste na prevenção de acidentes, ou quando tal não for possível, na mitigação das suas consequências, que possam:

- ✓ Fazer perigar a vida ou a saúde do pessoal em serviço nas obras;
- ✓ Afectar a segurança ou a funcionalidade das infra-estruturas preexistentes;
- ✓ Causar prejuízos materiais significativos;
- ✓ Causar atrasos injustificáveis nos cronogramas estabelecidos e, em particular, no prazo de conclusão da obra.

Atendendo a que a gestão dos riscos é uma actividade de carácter dinâmico, tendo em conta a necessidade de promover adaptações face à evolução dos trabalhos e ao surgimento de novas informações sobre as características dos maciços deve adoptar-se, em permanência, uma posição tendente a manter actualizadas as componentes da gestão dos riscos de modo a fazer face aos eventuais novos riscos ou aos riscos acrescidos que a evolução dos trabalhos venha a revelar.

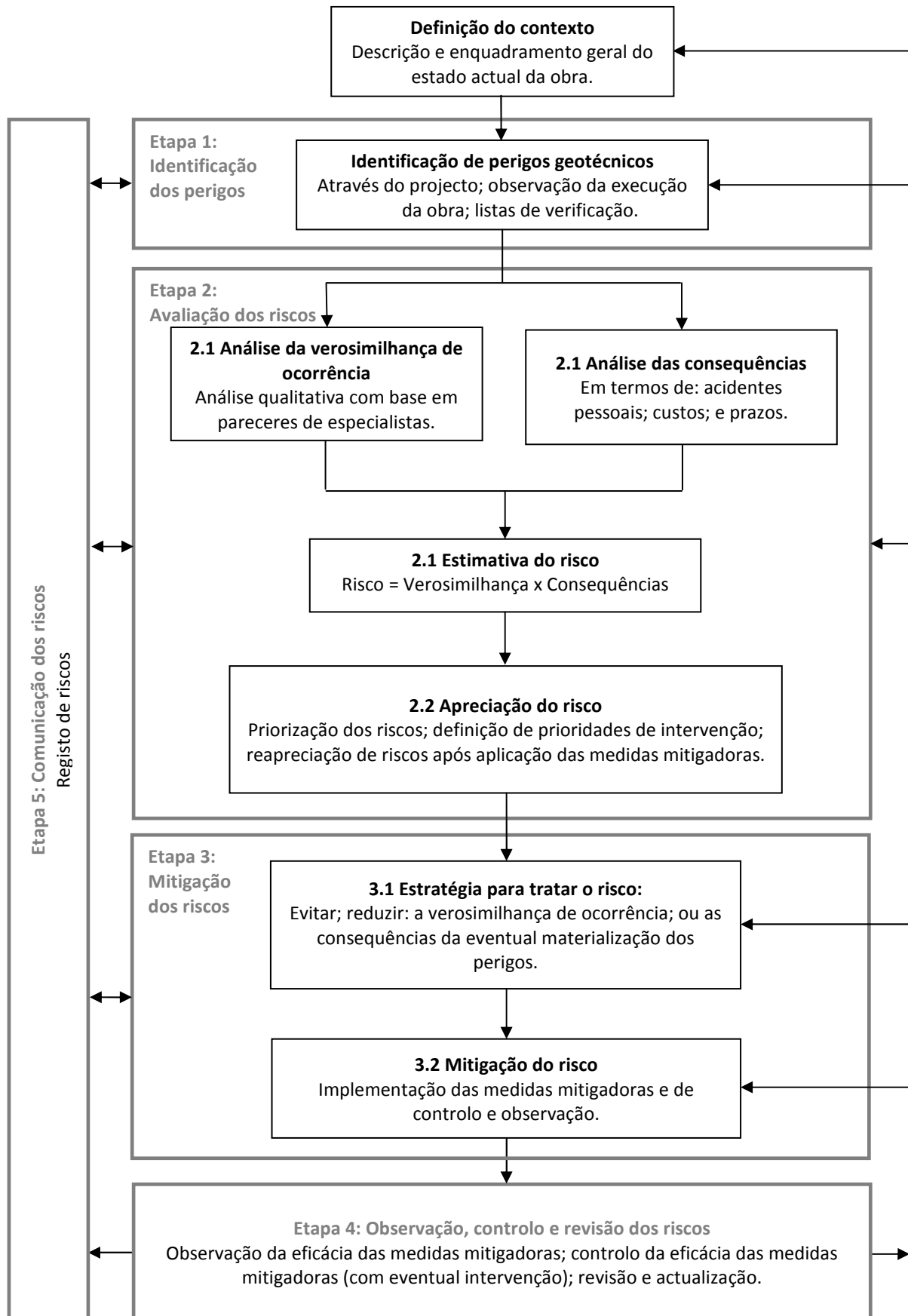


Figura 6.1. Proposta de metodologia de gestão do risco geotécnico.

## 6.2 DEFINIÇÃO DO CONTEXTO

A definição do contexto é um passo imprescindível no processo de gestão do risco. Este subcapítulo pretende, através de um resumo da informação recolhida a partir dos estudos geológico-geotécnicos, em termos de características gerais da obra, geologia do local a atravessar, trabalhos de prospecção realizados, considerações geotécnicas que incluem o zonamento geotécnico, a classificação geomecânica do maciço, e o dimensionamento do método de escavação e do sustimento, fazer um enquadramento geral da obra. Tudo isto para, posteriormente, se proceder à gestão do risco geotécnico através das etapas que lhe estão associadas.

### 6.2.1 Descrição geral da obra

O túnel seleccionado (Quadro 6.1) diz respeito a um túnel de adução de água, fazendo parte de um circuito hidráulico de uma barragem. Devido ao seu comprimento ser reduzido, o método de escavação proposto em projecto é o convencional, com recurso a explosivos. Recomenda-se ainda que sejam utilizados meios mecânicos de escavação como retroescavadora com martelo, nas zonas mais descomprimidas do maciço (zonas de esmagamento, emboquilhamentos, etc.). As características gerais do túnel estão resumidas no Quadro 6.1. A duração da construção está estimada em 18 meses e o seu custo rondará os 5 milhões de euros. Nestes valores já estão incluídos uma reserva de contingência para eventuais atrasos e/ou custos adicionais.

**Quadro 6.1. Características gerais da obra.**

Características gerais da obra	
Comprimento	1500 m
Recobrimento	60 a 80 m
Direcção	N 65 W
Diâmetro de escavação	3,6 m
Diâmetro interno	3 m
Secção de escavação	Ferradura
Secção útil	Circular
Revestimento definitivo	Betão armado
Espessura do revestimento	0,3 m
Método de escavação	Convencional (explosivos) Mecânico (retroescavadora com martelo hidráulico)
Frentes de ataque	2

## **6.2.2 Enquadramento geológico - geotécnico**

### **a) Geologia geral**

Ao longo do traçado do túnel ocorrem, essencialmente, as seguintes formações:

- ✓ Aluviões holocénicas;
- ✓ Coluviões holocénicos;
- ✓ Formações xisto-grauváquicas do Carbonífero.

As aluviões ocorrem nas linhas de água mais significativas, não interferindo com o túnel, já que se tratam de depósitos superficiais. Do mesmo modo, as coluviões interferem muito pouco com o traçado do túnel, eventualmente nos emboquilhamentos. São frequentes no sopé das vertentes e são constituídas geralmente por uma matriz siltosa a argilosa com fragmentos de rocha dispersos.

O maciço interessado pelo túnel é constituído por intercalações de filádios, xistos pelíticos, metarenitos e grauvaques. Estes terrenos apresentam-se dobrados e cortados por filões de quartzo e rochas básicas, relacionados com fenómenos de natureza intrusiva, com espessuras variáveis e segundo várias direcções e com baixa a muito baixa resistência. Os xistos pelíticos são de presença mais persistente, estimando-se que constituam, na região interessada pelo projecto, cerca de 75% do maciço rochoso. Os grauvaques ocorrem em camadas centimétricas a métricas, em geral competentes, salientando-se por vezes na paisagem como alinhamentos resistentes. Os metarenitos constituem tipos de transição.

### **b) Geomorfologia**

O túnel, com uma extensão de 1500 m, desenvolve-se numa região de relevo vigoroso, atravessado por densa rede de drenagem dendrítica e francamente encaixada em vales rectilíneos e cavados, característica dos terrenos xistosos.

### **c) Tectónica e estrutura**

A tectónica que afecta o maciço atravessado pelo túnel inclui dobras com planos axiais inclinando para NE. Na região estão presentes a 1ª fase de deformação compressiva, com orientação geral NW – SE, bem como a 2ª fase, que afectou a totalidade do substrato paleozóico, acompanhada de carreamentos e cavalgamentos.

As falhas que ocorrem na região têm orientações preferenciais de NE-SW, N-S, e NNW-SSE. Através de centenas de medições das atitudes de diversas discontinuidades ao longo do

traçado do túnel, foi possível identificar duas famílias principais de fracturação, respectivamente:

- ✓ N (50 – 80) E; (65 – 80) W;
- ✓ N 35 W; subvertical;

A atitude da xistosidade N (10 – 40) W; (55 – 75) E, é muito desfavorável a razoável à estabilidade do túnel. No que diz respeito às diaclases, presume-se que, à cota do atravessamento, elas ocorrerão praticamente fechadas e pouco extensas, à excepção de zonas de esmagamento localizadas. Geralmente os alinhamentos de fraqueza coincidem com as falhas, embora existam casos em que isso não se sucede, apresentando direcções paralelas às da xistosidade.

#### **d) Sismologia**

De acordo com os sismos históricos e instrumentais registados, e segundo a escala de Mercalli modificada, o local da implantação do túnel situa-se numa zona de intensidade macrossísmica máxima de grau VII. Segundo o Regulamento de Segurança a Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP, 1983), em termos de sismicidade o túnel situa-se na zona sísmica A, com um coeficiente de sismicidade  $\alpha = 1,0$ . Esta é a zona de maior risco sísmico de entre as quatro que compõem o território continental português. Os terrenos devem ser considerados do tipo I (rochas e solos coerentes rijos) nas zonas correspondentes aos maciços xistosos e estruturas filoneanas ou do tipo II (solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos) nas zonas correspondentes aos solos de alteração dos maciços xistosos, assim como das estruturas filoneanas e coluviões. O intervalo de valores para a aceleração, velocidade e deslocamento produzidos por um sismo com um período de retorno de 1000 anos, para o local da obra são (Oliveira, 1977):

- ✓ Aceleração ( $\text{cm.s}^{-2}$ ): 100 – 125;
- ✓ Velocidade ( $\text{cm.s}^{-1}$ ): 12 – 15;
- ✓ Deslocamento (cm): 6 – 7.

Face ao exposto, pode-se concluir que a obra se encontra localizada numa zona de sismicidade elevada.

#### **e) Hidrogeologia**

As formações xistentas caracterizam-se por um ambiente hidrogeológico heterogéneo e anisotrópico, verificando-se o escoamento através de fissuras, fracturas e falhas, exibindo



estas descontinuidades, densidades e dimensões muito variáveis, com interligações complexas e imprevisíveis. Os tipos de aquíferos com interesse geotécnico situam-se, próximo da superfície, onde devido à meteorização e à descompressão, é maior a densidade de descontinuidades abertas, desde modo, devido à profundidade do túnel, perspectiva-se que a sua abertura não terá impacto directo neles.

Quanto ao nível freático, os dados indicam que a sua profundidade média é da ordem dos 30 a 40 metros, isto é, acima das cotas de atravessamento do túnel. Atendo ao acentuado relevo e declives fortes da região, o escoamento superficial é muito importante e, consequentemente, o escoamento subterrâneo é reduzido.

Em grande parte da extensão do túnel prevê-se que, devido à ocorrência de diaclases essencialmente fechadas, em profundidade não se verifiquem caudais significativos. Em algumas zonas localizadas poderão ocorrer fracturas abertas em ligação a zonas mais superficiais do maciço rochoso. Esta situação poderá conduzir à afluência de caudais com elevada pressão ao interior da cavidade, agravando as condições de implantação da obra. Os filões fracturados também poderão conter água, embora com pressões mais baixas.

### **6.2.3 Trabalhos de prospecção geotécnica**

Os trabalhos de prospecção geofísica realizados para o túnel basearam-se, essencialmente, em sísmica de refração, nos emboquilhamentos do túnel, para avaliar a espessura de alteração do maciço e caracterizar os contactos, e prospecção geoeléctrica através do método da resistividade, ao longo do traçado do túnel, para identificar acidentes tectónicos, a sua orientação e evolução em profundidade. Da análise destes perfis verificou-se que, embora o túnel seja de uma extensão reduzida, o seu traçado revelou-se em algumas zonas bastante acidentado.

Quanto à prospecção mecânica, foram realizadas sondagens à rotação com recuperação do testemunho. Numa zona particular, não foi possível realizar sondagens devido às dificuldades de acesso ao alinhamento do túnel impostas, principalmente, pela morfologia. À excepção das sondagens nos emboquilhamentos, todas as outras foram feitas em vales na tentativa de detectar eventuais acidentes geológicos que tenham originado essas depressões e, ao mesmo tempo, furar zonas de menor recobrimento.

As sondagens de reconhecimento puseram em evidência que, além das falhas, a fracturação por diaclasamento era persistente, não só nos horizontes meteorizados como abaixo destes,

e que a intensidade de fracturação era maior nos xistos pelíticos do que nos arenitos finos e nos grauvaques.

Para caracterizar a permeabilidade do maciço ao nível do túnel, realizaram-se nas sondagens ensaios de absorção de água do tipo Lugeon, ao longo de todo o comprimento do furo (em sondagens nos emboquilhamentos), ou na zona de influência do túnel, (em sondagens ao longo do traçado do túnel). Os ensaios foram executados em trechos de 3 m ou 5 m consoante as condições de fracturação do maciço, utilizando 5 patamares de pressão.

#### **6.2.4 Considerações geotécnicas**

Através da informação recolhida conclui-se que o cenário mais provável durante a abertura do túnel será a ocorrência de alternâncias de xistos com rochas duras a muito duras (metarenitos e grauvaques) e com rochas menos resistentes, os filádios.

Os filões de quartzo identificados ao longo do traçado são relativamente abundantes, mas não apresentam, em geral, grande espessura pelo que não apresentarão, em princípio, dificuldades de maior para a abertura da escavação. De referir que, no entanto, apresentam-se, em geral, bastante fracturados, o que poderá provocar zonas localizadas de fraca qualidade e com ocorrência de caudais que poderão ser anormais.

Ao longo do túnel, o maciço melhora em profundidade e a avaliar pelas características observadas nas sondagens, apresentar-se-á são a pouco alterado às cotas de atravessamento, a profundidades da ordem dos 60 a 80 metros.

Durante o reconhecimento geológico de superfície e no decorrer dos trabalhos de prospecção foi possível confirmar algumas estruturas como falhas, dobras e filões. A interacção destas estruturas com o túnel é relativamente difícil de avaliar, atendendo por um lado, à sua profundidade média, e por outro lado, considerando a escassez de informação objectiva acerca da expressão real dos acidentes referidos a essa profundidade.

Contudo, observou-se a ocorrência de uma falha importante, interceptada por uma das sondagens realizadas. Trata-se de um acidente com orientação NE-SW e inclinação de 70° para N. Presume-se, pela sua importância, que terá expressão profunda, às cotas de atravessamento do túnel.

As diaclases à superfície são extensas, pouco abertas, próximas a medianamente afastadas, pouco rugosas, por vezes planares a onduladas. Apresentam muito frequentemente as paredes alteradas e oxidadas e enchimentos argilosos. De acordo com a observação dos testemunhos de sondagem, prevê-se que a partir de profundidades superiores a 40 m, o maciço apresente uma melhoria das condições das diaclases, que deverão ocorrer fechadas, ou com pequena abertura, e enchimento duro não erodível, com raros depósitos de óxidos ou hidróxidos de ferro e geralmente medianamente afastadas a afastadas.

Quanto à xistosidade, os dados apontam para uma orientação sub-paralela a oblíqua ao túnel, geralmente razoável a muito desfavorável. Saliente-se, contudo, que o intenso dobramento das formações e as conseqüentes variações de atitude da xistosidade nos flancos das dobras poderão ocasionar atitudes dos planos de xistosidade pontualmente mais favoráveis.

Os resultados dos ensaios Lugeon, configuram um maciço bastante permeável à superfície e nos primeiros metros, correspondentes aos emboquilhamentos do túnel, verificando-se que, nas zonas mais profundas, correspondendo à maioria do traçado, a permeabilidade é baixa a muita baixa. Esta situação pode se agravar em zonas de falha, esmagamento ou filões fracturados.

#### 6.2.4.1 Zonamento geotécnico

Com base nos estudos anteriores o maciço rochoso foi dividido em três zonas geotécnicas, em função do estado de alteração, fracturação, permeabilidade e valores de resistividade (Quadro 6.2). Na Figura 6.2 é ilustrado um esboço do zonamento geotécnico adoptado ao longo do eixo do túnel.

**Quadro 6.2. Zonamento geotécnico do maciço.**

Zona Geotécnica	Alteração (W)	Fracturação (F)	% REC	RQD (%)	Resistividade ( $\Omega.m$ )	Permeabilidade (Lu)	% média no eixo (m)
ZG1	1-2	3	>90	>80	200-400	<4*	≈63 (950)
ZG2	3,4	4	65-90	50 - 80	100-200	4-10*	≈32 (480)
ZG3	4-5	4-5, por vezes esmagado	<65	<50	<100	>10	≈ 5 (70**)

\*podendo ocasionalmente ser maior do que 20 em zonas muito fracturadas.

\*\*40 m no emboquilhamento NW e 30 m no emboquilhamento SE. A ZG3 também ocorre ao longo do alinhamento do túnel essencialmente em zonas de fraqueza e bastante esmagadas, cuja espessura é indefinida.

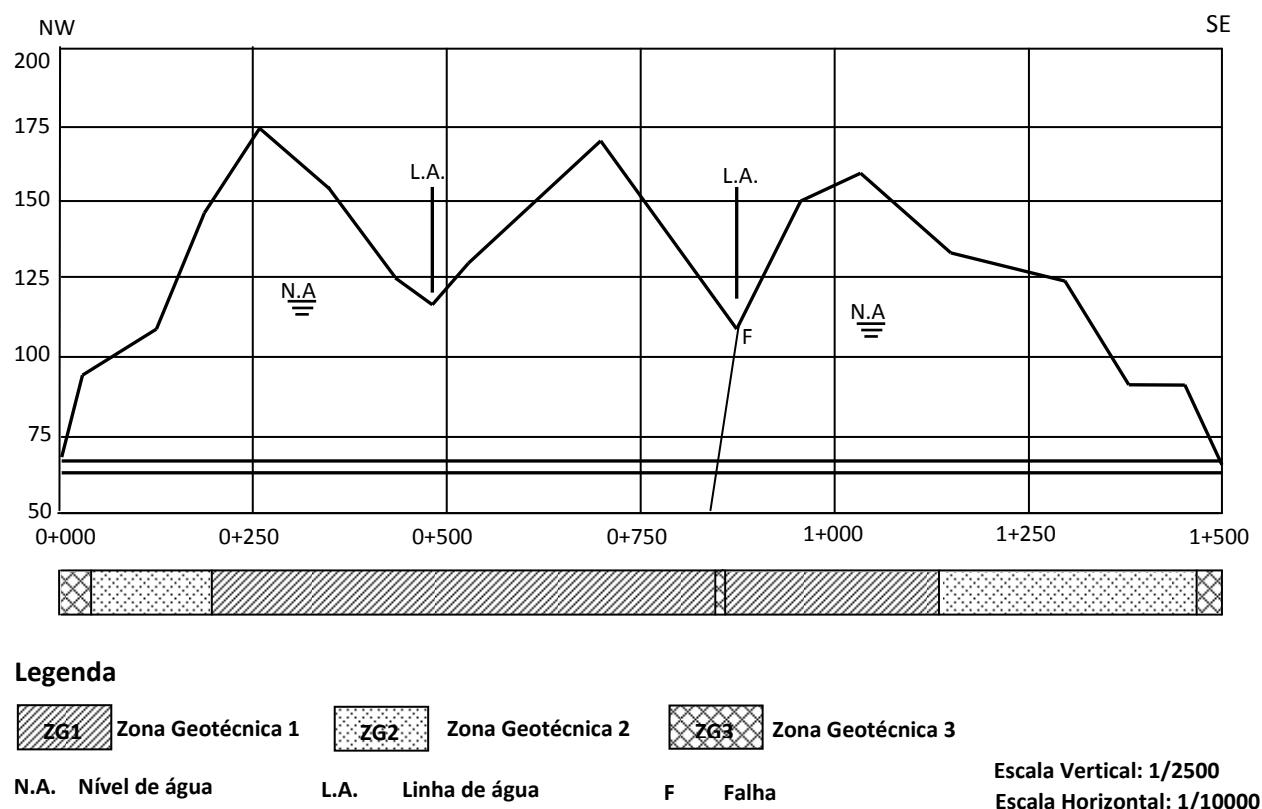


Figura 6.2. Zonamento geotécnico adoptado ao longo do eixo do túnel.

#### 6.2.4.2 Classificação geomecânica do maciço

Para cada uma das zonas geotécnicas referidas, aplicaram-se as classificações empíricas para maciços rochosos, nomeadamente a classificação geomecânica RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989) e o sistema Q de Barton (2002). Nos Quadros 6.3 e 6.4 apresentam-se os resultados obtidos daquelas classificações para o maciço a interessar. No Quadro 6.5 são apresentados os parâmetros geomecânicos adoptados no projecto.

Quadro 6.3. Classificação geomecânica (Bieniawsky, 1989).

Zona Geotécnica	RCU (MPa)	RQD (%)	Descontinuidades		Água subterrânea	RMR		Classe do maciço
			Afastamento	Condições		Básico	Corrigido	
ZG1	50-100	>80	F3	Superfícies rugosas inalteradas	Completamente seco	79	67-79	II (boa)
ZG2	25-50	50-70	F4	Superfícies ligeiramente rugosas / alteradas	Húmido	57	45-57	III (razoável)
ZG3	<25	<50	F4-5	Enchimento <5mm	Fluxo contínuo	20	8-20	V (muito fraca)

Quadro 6.4. Sistema Q (Barton, 2002).

Zona Geotécnica	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q
ZG1	>80	2 a 3 famílias	Rugosas e onduladas	Paredes não alteradas	Seco	Zonas de esmagamento esporádicas	16 (boa)
ZG2	50 - 70	3 famílias	Ligeiramente rugosas e pouco onduladas a planas	Ligeira alteração nas paredes	Caudal pequeno	Zonas de cisalhamento esporádicas	2 (fraca)
ZG3	< 50	3 famílias e fracturas aleatórias	Oxidadas com enchimento argiloso contínuo	Enchimento argiloso <5mm	Caudal médio	Rocha decomposta com múltiplas zonas de cisalhamento	0,017 (extremamente fraca)

Quadro 6.5. Parâmetros geomecânicos adoptados no projecto.

Zona geotécnica	Parâmetros		
	$\phi_m (^{\circ})$	c (kPa)	E (GPa)
ZG1	40	350	35
ZG2	30	250	15
ZG3	13	90	3

#### 6.2.4.3 Dimensionamento do método de escavação e sustimento

A escavação do túnel, nas zonas tipificadas como ZG1 e ZG2, processar-se-á com a utilização de explosivos. Nas zonas ZG3, a escavação será efectuada predominantemente com recurso a meios mecânicos ligeiros (retroescavadora com martelo hidráulico), preconizando-se avanços em secções parciais. Para cada situação será aplicado um sustimento, que garanta a estabilidade do maciço até à aplicação do revestimento.

Nas zonas ZG1 e ZG2 os explosivos serão utilizados de modo controlado e com recurso à técnica de *smooth blasting*, de modo a induzir a menor perturbação no maciço e evitar eventuais desprendimentos de blocos do tecto e nascentes. De uma forma geral, serão utilizados Jumbos de dois braços na perfuração do diagrama de fogo, após a qual serão carregados os explosivos e detonada a frente. Os diagramas de fogo utilizados neste túnel, no que se refere ao número de furos, quantidade de explosivos e carga instantânea detonada, deverão sofrer adaptações apenas dependentes do tipo de rocha a desmontar, uma vez que não se verificou a presença de estruturas nas imediações.

Está prevista a implementação de sistemas de controlo e observação, quer das vibrações provocadas pelos explosivos, quer das deformações do maciço rochoso ou do sustimento

aplicado. Outras medidas podem resultar da aplicação da metodologia de gestão dos riscos proposta a outros novos, que as informações obtidas durante a execução dos trabalhos recomendem.

Com base nas classificações geomecânicas, foi efectuado um dimensionamento do sustimento, tendo em conta o desmonte com explosivos, *i.e.*, foram definidas as diferentes classes de suporte para cada zona geotécnica, separadamente. Essas classificações forneceram também recomendações quanto ao modo de escavação. Tendo em conta as características geométricas e hidráulicas do túnel foram feitas as seguintes considerações acerca do sustimento:

ZG 1 – A escavação é feita em secção total, com avanço da frente em trechos contínuos de 1,5 m. O sustimento primário será constituído por betão projectado de 5 cm de espessura e fibras metálicas no tecto quando necessário. São aplicadas pregagens pontuais, no tecto nas zonas mais descomprimidas e/ou nos blocos na iminência de colapso, com 3 m de comprimento.

ZG 2 – O avanço para esta zona é feito em trechos contínuos de 2 m em secção parcial (frente e rebaixo), com aplicação imediata do sustimento. Este será constituído por betão projectado com 5 cm de espessura no tecto e 3 cm nos hasteais, armado com fibras metálicas. São aplicadas pregagens sistemáticas do tipo Swellex, com 4 m de comprimento em auréolas no tecto e hasteais, com espaçamento de 2 m.

ZG 3 – Estima-se em projecto que a zona ZG3 interesse os emboquilhamentos do túnel numa extensão relativamente limitada, na qual o maciço se encontra mais descomprimido e alterado. De notar ainda a ocorrência de alguns trechos do maciço muito descomprimido, com características geotécnicas típicas da ZG3, ao longo do traçado. Existem ainda zonas singulares que poderão eventualmente apresentar características piores do que a ZG3, nomeadamente zonas de argilificação dos filádios, zonas de esmagamento de grande espessura ou falhas importantes, e filões que poderão atingir possanças importantes (de pelo menos 1 m), com fracas características geotécnicas. O sustimento deve contemplar betão projectado de 15 cm de espessura no tecto e hasteais, com fibras metálicas, pregagens sistemáticas do tipo Swellex no tecto e hasteais com 5 m de comprimento, em auréolas espaçadas de 1 m com malha. Nas zonas muito esmagadas serão ainda aplicadas

cambotas com espaçamento a definir em função das condições geotécnicas, estimando-se que possam vir a ter afastamento da ordem de 0,75 m. Além deste sustimento sistemático, preconiza-se a aplicação de betão projectado na frente, sempre que necessário, fazendo-se a escavação em secção total com 1 m de avanço, eventualmente com um pequeno degrau e avanço da semi-secção superior se a frente for invulgarmente instável.

Os avanços da escavação serão controlados, com execução prévia de sondagens na frente e realização da cartografia geológica e da caracterização geotécnica (caracterização litológica do maciço, estrutura dominante, fracturação, descontinuidades (lisas ou onduladas, abertura, enchimento e alteração), condições hidrogeológicas, grau de alteração da rocha e de resistência mecânica, as zonas de falhas (dimensões da “caixa” e caracterização do enchimento) e as zonas de dobramento e esmagamento, que permitam, aferir os elementos de projecto disponíveis e, eventualmente, identificar novos perigos.

Preconiza-se que sejam executados furos à rotopercussão, com comprimento variável entre 4 a 6 vezes o trecho de avanço, na frente da escavação para a captação e drenagem da água subterrânea e detecção de zonas muito tectonizadas ou esmagadas. No caso da ocorrência de situações anómalas, prevê-se o tratamento do maciço antes de atingir essas zonas com a escavação. Por exemplo, na zona ZG3 sempre que se mostrar prudente, de modo a evitar eventuais desprendimentos de blocos do tecto e nascentes, executar-se-ão trabalhos de pré-contenção, executando guarda-chuvas de enfilagens ao abrigo dos quais se desenvolverá a escavação.

### 6.3 IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS GEOTÉCNICOS

Os perigos geotécnicos associados à construção deste túnel são essencialmente de duas índoles:

- ✓ Condições geológico-geotécnicas e hidrogeológicas dos maciços;
- ✓ Acções decorrentes da construção (abertura do túnel) e aos processos construtivos (método de desmonte por explosivos ou por meios mecânicos).

Não serão considerados, no âmbito deste trabalho, os riscos inerentes à segurança do pessoal nem os eventuais danos ambientais, atendendo a que os mesmos são objecto de regulação no âmbito do Plano de Segurança e Saúde. Serão, no entanto, considerados os

riscos associados a eventuais acidentes causados por eventos relacionados com a execução da obra (queda de blocos, colapso do túnel, etc.).

No Quadro 6.6 são apresentados os perigos geotécnicos de projecto e os que possivelmente poderão ser detectados durante a construção. A sua localização precisa é impossível de definir devido à escassez de dados e, consequentemente, a difícil extrapolação de resultados, que dificultam a caracterização do maciço e o estabelecimento de um modelo o mais próximo possível da realidade. De referir que este quadro teve como base a informação recolhida na definição do contexto (ver 6.2) e as listas de verificação apresentadas no Capítulo 3, cuja versão integral se encontra no Quadro I.A - Anexo I, com as devidas adaptações a este projecto em particular.

Aos perigos deverá ser atribuída uma numeração por ordem crescente em função da sua identificação ao longo do tempo; contudo, para este caso e pelas razões que lhe estão associadas isso não se sucede; àqueles que estão relacionados com o método/técnica construtiva será acrescentada a letra C; no caso de um perigo ser objecto de uma ou mais reavaliações, passará a ser designado pelo mesmo número, seguido de uma ou mais letras (R – reavaliação em função de novas informações ou M – reavaliação em função das medidas de mitigação e controlo e observação) consoante esse número (*e.g.*, 4RM significará que o perigo com o número 4 foi objecto de duas reavaliações sucessivas, a primeira em função de novas informações e a segunda em função das medidas de mitigação e de controlo e observação preconizadas).

O Quadro 6.6, que constitui um excerto do Quadro II.A – Anexo II apresenta, a título exemplificativo, quatro riscos identificados para o presente caso de estudo. Dois deles correspondem a aspectos puramente geotécnicos e os outros dois estão relacionados com o método de escavação adoptado. Como o túnel em questão, diz respeito a um caso hipotético e o seu acompanhamento durante a construção na realidade não existiu, serão reavaliados, a título exemplificativo, dois dos perigos que apresentem um nível de risco intolerável e elevado, respectivamente.



Quadro 6.6. Identificação dos perigos (excerto do Quadro II.A – Anexo II).

Perigo	Localização <sup>(3)</sup>	Descrição	Causas e factores de exposição	Indícios associados à materialização do perigo
1	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	Maciço descomprimido e fracturado, descontinuidades com atitudes cinematicamente desfavoráveis; solos de alteração e coluvionares com fragmentos de rocha dispersos e soltos; declives elevados.	Abertura de fendas; queda de pequenos blocos ou sinais de outros movimentos superficiais (escorregamentos circulares/planares).
6	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	Fenómenos de grande deformação essencialmente associados à fluência; presença de materiais rochosos com comportamento plástico ( <i>flysh</i> ), e semi-plástico, sensíveis à deformação a níveis de tensão relativamente baixos, podendo deslocar-se para o interior do túnel; materiais que exibam aumento de volume por absorção de água (xistos, caixas de falha com enchimento argiloso, argilificação dos filádios), deslocando-se para o interior do túnel.	Convergências radiais anómalas/elevadas; presença de água em rochas plásticas e/ou ricas em minerais argilosos expansivos.
11C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) e mecanicamente (ZG3).	Colapso.	Tempos de auto - sustentação incompatíveis com a duração do ciclo escavação - estabilização por recobrimento reduzido e/ou comprimento do vão não suportado excessivo e/ou inadequada parcialização da frente; avanços excessivos na escavação; sustimento insuficiente.	Descompressão anormal do maciço, sustimento insuficiente nas proximidades da frente de escavação; instabilidade da secção escavada; convergências excessivas; fenómenos de sobrefracturação.
13C	Ao longo do alinhamento, sobretudo nas zonas ZG3.	Esforços elevados no sustimento.	Alteração excessiva do estado de tensão <i>in situ</i> devido à escavação e/ou tempo exagerado até aplicação do sustimento; subestimação das tensões efectivas <i>in situ</i> ; sustimento subdimensionado, mal instalado.	Deformações no sustimento; fissuras no betão projectado; convergências excessivas; deformações nas cambotas metálicas; sucessivos assentamentos no pé das mesmas.
1M	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	Maciço descomprimido e fracturado, descontinuidades com atitudes cinematicamente desfavoráveis; solos de alteração e coluvionares com fragmentos de rocha dispersos e soltos; declives elevados.	....
6M	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	Fenómenos de grande deformação essencialmente associados à fluência; presença de materiais rochosos com comportamento plástico ( <i>flysh</i> ), e semi-plástico, sensíveis à deformação a níveis de tensão relativamente baixos, podendo deslocar-se para o interior do túnel; materiais que exibam aumento de volume por absorção de água (xistos, caixas de falha com enchimento argiloso, argilificação dos filádios), deslocando-se para o interior do túnel.	....

<sup>3</sup> Nesta coluna deverá introduzir-se o quilómetro do perfil em que ocorre o perigo (e.g., Pk 0+210 – Pk 0+220). Uma vez que não se dispunha dessa informação, introduziu-se a zona mais provável de ocorrência do evento.

## 6.4 AVALIAÇÃO DOS RISCOS

### 6.4.1 Análise

Nesta etapa é necessário, *a priori*, definir os critérios de avaliação da verosimilhança da ocorrência dos perigos. A atribuição de uma determinada classe de verosimilhança decorrerá da análise do que pode acontecer (como o caso do aparecimento de blocos instáveis em taludes de escavação nos emboquilhamentos), das respectivas causas prováveis (orientação das descontinuidades favorável à geração desses blocos) e do modo como o evento indesejável (destacamento dos blocos) se pode produzir.

Optou-se por recorrer a um quadro resultante da adaptação de conceitos recomendados noutros estudos semelhantes para a gestão dos riscos geotécnicos, que se traduz pelas relações constantes do Quadro 6.7.

**Quadro 6.7. Avaliação da verosimilhança da ocorrência dos perigos (Clayton, 2001, adaptado).**

Escala	Verosimilhança	Possibilidade de ocorrência (expressa em termos de 1 em n)
1	Mínima	< 1 em 100
2	Pouco provável	De 1 em 100 a 1 em 10
3	Provável	1 em 10 a 1 em 2
4	Muito provável	> 1 em 2

Apesar desta atribuição estar naturalmente eivada de subjectividade; ela é, no entanto, tanto menor quanto maior é o conhecimento das características dos maciços e do seu comportamento. Esse grau de subjectividade não diminuiria em resultado de uma eventual abordagem quantitativa, com a consideração de uma abordagem probabilística, dado que as distribuições de probabilidades e/ou os valores atribuídos, para além de carecerem, na generalidade dos casos, de significado físico, poderiam conduzir a uma falsa sensação de rigor e, eventualmente, de segurança (Gomes, 2010). Por outro lado, a aplicação do quadro, em particular a perigos da mesma índole, permitirá certamente ir refinando o processo.

Assim, julga-se possível que, após uma abordagem um pouco mais conservativa nas apreciações iniciais, seja viável adoptar apreciações sucessivamente mais ajustadas à realidade, com os consequentes ganhos de eficiência (*op. cit.*). Seguidamente apresentam-se, os critérios de avaliação das consequências dos perigos identificados.

As consequências da eventual materialização dos perigos para esta obra foram divididas essencialmente em termos de: acidentes pessoais; custos; e prazos.

Do Quadro 6.8 consta a relação entre a tipologia dos acidentes pessoais (ausência de consequências, feridos ligeiros, feridos graves ou mortes), a apreciação qualitativa correspondente e o escalonamento de valores associado. O escalonamento adoptado, que será mantido para os outros tipos de consequências, procura traduzir a gravidade relativa das consequências.

**Quadro 6.8. Acidentes pessoais (AP).**

Escala (AP)	Consequências	Acidentes pessoais
0	Nulas	0
2	Baixas	1 a 2 feridos ligeiros
4	Significativas	> 2 feridos ligeiros
8	Elevadas	Feridos graves
16	Muito elevadas	Mortes

O Quadro 6.9 mostra a relação entre o incremento de custos associado à materialização do perigo, expresso em termos da percentagem do custo total da obra em causa, a apreciação qualitativa correspondente e o escalonamento de valores associado.

**Quadro 6.9. Incremento de custos (IC).**

Escala (IC)	Consequências	Incremento de custos (% do custo da obra - p)
0	Nulas	$p = 0$
2	Baixas	$p < 1$
4	Significativas	$1 \leq p < 3$
8	Elevadas	$3 \leq p < 10$
16	Muito elevadas	$p \geq 10$

No Quadro 6.10 define-se a relação do atraso na conclusão da obra em causa devido à materialização do perigo, expresso em termos da percentagem do prazo da respectiva conclusão, a apreciação qualitativa correspondente e o escalonamento de valores associado.

**Quadro 6.10. Atrasos na conclusão das obras (AO).**

Escala (AO)	Consequências	Atraso da obra (% do prazo de conclusão da obra - a)
0	Nulas	$a = 0$
2	Baixas	$0 \leq a < 1$
4	Significativas	$1 \leq a < 3$
8	Elevadas	$3 \leq a < 10$
16	Muito elevadas	$a \geq 10$

Gomes (2010) considera que também no caso das consequências, uma abordagem probabilística carece, de significado, dado que envolveria a consideração de inúmeros cenários e das respectivas probabilidades de ocorrência, com as dificuldades associadas à atribuição de valores que correspondem efectivamente à realidade. Por outro lado, na

atribuição dos valores aos três tipos de consequências ter-se-á em conta as condições mais desfavoráveis, o que significa que os “valores” do risco estarão do lado da segurança. Para exemplificar esta problemática utilizar-se-á o caso já mencionado relacionado com a geração de blocos instáveis nos taludes de escavação dos emboquilhamentos do túnel. Ao contrário de calcular o risco associado considerando as probabilidades de materialização do perigo e a condicionada pelas respectivas consequências, tarefa necessariamente difícil de acordo com a metodologia proposta, será atribuído um valor conservativo à verosimilhança dessa ocorrência e valores, também conservativos, às respectivas consequências (materialização do perigo durante os períodos de trabalho, com pessoal nas áreas eventualmente afectadas, com a presença de equipamentos habitualmente utilizados na área afectada, considerando as circunstâncias mais desfavoráveis em termos da afectação de prazos, etc.).

O cálculo do factor consequências, é designado por C. Este factor será obtido através da ponderação dos diversos tipos de consequências. Nessa ponderação teve-se em conta, a maior importância relativa dos acidentes pessoais que terá, por isso, maior penalização na ulterior influência no escalonamento dos níveis de risco (ver item 6.4.2). Às consequências em termos de custos e de prazos, foi dada a mesma importância relativa.

O valor de C será dado por:

$$\checkmark \quad C = 0,60 \times AP + 0,20 \times IC + 0,20 \times AO \quad (6.1)$$

Aplicando estes quadros, o risco correspondente a cada perigo será obtido pelo produto dos valores da verosimilhança da materialização do perigo (V) pelo valor resultante da ponderação das consequências ( $R = V \times C$ ).

Apesar de na metodologia adoptada, o valor de C ser obtido através do cálculo ponderado dos três tipos de consequências consideradas pode-se, para ter noção da respectiva influência individual, calcular as matrizes dos riscos associados aos acidentes pessoais e aos custos (ou prazos). Os valores constantes dessas matrizes (Quadros 6.11 e 6.12) resultam dos produtos do coeficiente de ponderação pela verosimilhança (V) e pelo “valor” das consequências. Assim, os valores do quadro relativo aos acidentes pessoais (Quadro 6.11) são calculados por:

$$\checkmark \quad R (AP) = 0,6 \times V \times AP; \text{ e} \quad (6.2)$$

Os valores do quadro relativo aos incrementos de custos (ou aos prazos) (Quadro 6.12) são calculados por:

$$\checkmark R = 0,2 \times V \times IC \text{ (ou AO)} \quad (6.3)$$

**Quadro 6.11. Matriz dos riscos associados aos acidentes pessoais (AP).**

		Consequências (AP)				
		0	2	4	8	16
Verossimilhança	1	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	2	0	2,4	4,8	9,6	19,2
	3	0	3,6	7,2	14,4	28,8
	4	0	4,8	9,6	19,2	38,4

**Quadro 6.12. Matriz dos riscos associados aos custos ou aos prazos (IC ou AO).**

		Consequências (IC ou AO)				
		0	2	4	8	16
Verossimilhança	1	0	0,4	0,8	1,6	3,2
	2	0	0,8	1,6	3,2	6,4
	3	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	4	0	1,6	3,2	6,4	12,8

No Quadro 6.13, que constitui um excerto do Quadro II.B – Anexo II, é apresentada a análise dos riscos anteriormente identificados no Quadro 6.6.

**Quadro 6.13. Análise dos riscos (excerto do Quadro II.B – Anexo II).**

Perigo	Localização	Descrição	Verosim.	Consequências			Risco
				Acidentes pessoais (AP)	Custos (IC)	Prazos (AO)	
1	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	4	8	2	2	22,4
6	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	3	2	4	4	8,4
11C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) e mecanicamente (ZG3).	Colapso.	2	8	4	4	12,8
13C	Ao longo do alinhamento, sobretudo nas zonas ZG3.	Esforços elevados no sustimento.	2	2	4	4	5,6
1M	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	1	0	2	2	0,8
6M	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	3	0	2	2	2,4

## 6.4.2 Apreciação

Calculado o valor do risco, a partir dos valores da escala da verosimilhança e da ponderação das consequências, segue-se a definição dos níveis de risco que apoiarão a tomada de medidas visando a redução do risco ou, quando tal não for possível (apenas os riscos cujo nível for considerado intolerável terão de ser objecto de medidas de redução de risco), o seu respectivo controlo e observação. No Quadro 6.14 apresenta-se a relação entre os valores do risco, os níveis associados e as acções a empreender.

**Quadro 6.14. Aceitabilidade dos riscos.**

Nível do risco	Valor do risco	Tipo de acção	Descrição das acções a empreender
Aceitável	$R < 3,6$	4	Preconizar acções de vigilância que possibilitem a detecção dos indícios reveladores do eventual início da materialização do perigo.
Significativo	$3,6 \leq R < 6$	3	Adopção de medidas de redução de riscos, por diminuição da verosimilhança de ocorrência e/ou por redução dos valores das consequências, respeitando o princípio ALARP (princípio de acordo com o qual só é admissível que um risco não seja reduzido se a redução for impraticável ou se os custos associados forem desproporcionados, tendo em atenção o nível do risco, relativamente aos benefícios daí decorrentes. Quando os perigos são identificados durante a fase de execução, a este nível de risco corresponderá habitualmente a adopção de medidas correctivas de carácter expedito e, eventualmente, de controlo e observação.
Elevado	$6 \leq R < 9,6$	2	Adopção de medidas de redução de riscos, por diminuição da verosimilhança de ocorrência e/ou por redução dos valores das consequências, respeitando o princípio ALARP (os riscos de nível significativo ou elevado são toleráveis desde que respeitem este princípio). Quando o nível de risco residual resultar ainda elevado, deve proceder-se a um estudo de que resulte uma decisão fundamentada sobre a necessidade do estabelecimento de um Plano de contingência (fazer face às incertezas associadas à avaliação do risco) e da implementação de medidas de controlo e observação; neste caso deve ainda ser considerada a realização de trabalhos de reconhecimento complementar. Se os perigos forem identificados durante a fase de execução dos trabalhos, estes deverão ser imediatamente suspensos até à implementação de medidas de mitigação. Quando o nível de risco residual resultar ainda elevado devem reequacionar-se as medidas anteriormente referidas quanto ao Plano de contingência, às medidas de controlo e observação e ao reconhecimento complementar.
Intolerável	$R \geq 9,6$	1	Adopção de medidas de redução de riscos, por diminuição da verosimilhança de ocorrência e/ou por redução dos valores das consequências. Não poderão iniciar-se quaisquer trabalhos que envolvam perigos a que correspondam níveis de risco intoleráveis. Se os perigos forem identificados durante a fase de execução dos trabalhos, estes deverão ser imediatamente suspensos até à implementação de medidas de mitigação que se traduzam numa diminuição do nível de risco. Em qualquer caso, e desde que o nível de risco residual seja significativo ou elevado, a identificação de um perigo a que corresponda um nível de risco inicial intolerável implicará a realização de um estudo de que resulte uma decisão fundamentada sobre a necessidade do estabelecimento de um Plano de contingência, e da adopção de medidas de controlo e observação; neste caso deve ainda ser considerada a realização de trabalhos de reconhecimento complementar.

O valor mínimo para que o nível de risco seja considerado **intolerável** corresponde a qualquer perigo cuja ocorrência seja **provável** e que, a materializar-se, mesmo que não provoque acidentes pessoais, tenha consequências **elevadas** simultaneamente em termos de custos e de prazos.

$$\checkmark \quad C = 0,6 \times 0 + 0,20 \times 8 + 0,20 \times 8 = \mathbf{3,2} \quad R = 3,2 \times 3 = \mathbf{9,6}$$

Sendo este o valor mínimo se, para a mesma verosimilhança, resultassem feridos graves, mesmo sem outras consequências, o risco seria sempre intolerável. Em termos de custos e de prazos, o nível de risco só é intolerável quando as consequências forem simultaneamente elevadas, ou uma delas for muito elevada.

Por sua vez, o valor mínimo para que o nível de risco seja considerado **elevado** corresponde a qualquer perigo cuja ocorrência seja **provável** e que, a materializar-se, mesmo que não provoque acidentes pessoais, tenha consequências **elevadas** em termos de custos (ou de prazos) e consequências **baixas**<sup>4</sup> em termos de prazos (ou de custos).

$$\checkmark \quad C = 0,6 \times 0 + 0,20 \times 8 + 0,20 \times 2 = 0 + 1,6 + 0,4 = \mathbf{2} \quad R = 2 \times 3 = \mathbf{6}$$

Finalmente, o valor mínimo para que o nível de risco seja considerado **significativo** corresponde a qualquer perigo cuja ocorrência seja **provável** e que, a materializar-se, mesmo que não provoque acidentes pessoais, tenha consequências **significativas** em termos de custos (ou de prazos) e consequências **baixas** em termos de prazos (ou de custos).

$$\checkmark \quad C = 0,6 \times 0 + 0,20 \times 4 + 0,20 \times 2 = \mathbf{1,2} \quad R = 1,2 \times 3 = \mathbf{3,6}$$

Salienta-se que, caso as consequências em termos de acidentes pessoais signifiquem perda de vidas, mesmo que a verosimilhança seja mínima e não haja consequências em termos de custos e de prazos, o risco é intolerável.

$$\checkmark \quad C = 0,6 \times 16 = \mathbf{9,6} \quad R = 9,6 \times 1 = \mathbf{9,6}$$

Atendendo aos valores estabelecidos para os riscos, as matrizes dos níveis de risco podem ser apresentadas da forma seguinte (Quadros 6.15 e 6.16):

<sup>4</sup> Pressupõe-se que, se as consequências em termos de custos (ou de prazos) são elevadas, as consequências em termos de prazos (ou de custos) são, pelo menos, baixas.

**Quadro 6.15. Matriz dos níveis de risco relativa aos acidentes pessoais.**

		Consequências (AP)				
		0	2	4	8	16
Verossimilhança	1	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	2	0	2,4	4,8	9,6	19,2
	3	0	3,6	7,2	14,4	28,8
	4	0	4,8	9,6	19,2	38,4

**Quadro 6.16. Matriz dos níveis de risco relativa aos custos ou aos prazos.**

		Consequências (IC ou AO)				
		0	2	4	8	16
Verossimilhança	1	0	0,4	0,8	1,6	3,2
	2	0	0,8	1,6	3,2	6,4
	3	0	1,2	2,4	4,8	9,6
	4	0	1,6	3,2	6,4	12,8

A matriz relativa aos acidentes pessoais, quando considerados individualmente, mostra que o nível de risco é elevado quando o perigo é provável e as consequências se traduzem em mais que dois feridos ligeiros, e são intoleráveis nas seguintes circunstâncias:

- ✓ O perigo é muito provável e ocorrem mais que dois feridos ligeiros;
- ✓ O perigo é provável ou muito provável e ocorrem feridos graves;
- ✓ Ocorrem mortes, independentemente da “probabilidade” de ocorrência do evento.

Por sua vez, a matriz relativa aos custos (ou aos prazos), quando considerados individualmente, mostra que o nível de risco é elevado quando o perigo é muito provável e as consequências são elevadas ou o perigo é pouco provável mas as consequências são muito elevadas, e são intoleráveis quando as consequências são muito elevadas para perigos prováveis ou muito prováveis.

O Quadro 6.17, que constitui um excerto do Quadro II.C – Anexo II, apresenta a título exemplificativo, a apreciação dos riscos anteriormente analisados no Quadro 6.13. Este quadro é de preenchimento automático em face dos valores do risco constantes desse Quadro 6.13 e do nível de risco e respectiva correspondência com as ações a empreender resultantes da “aplicação” do Quadro 6.14.



**Quadro 6.17. Apreciação dos riscos e definição das acções a empreender (excerto do Quadro II.C – Anexo II).**

Perigo	Risco	Nível de risco	Tipo de acção
1	22,4	Intolerável	1
6	8,4	Elevado	2
11C	12,8	Intolerável	1
13C	5,6	Significativo	3
1M	0,8	Aceitável	4
6M	2,4	Aceitável	4

## 6.5 MITIGAÇÃO DOS RISCOS

O Quadro 6.18, que constitui um excerto do Quadro II.D – Anexo II, apresenta as medidas de mitigação e de controlo e observação que poderão, caso sejam aprovadas pelas partes intervenientes, ser implementadas na fase de construção afim de reduzir para um nível residual, os riscos anteriormente identificados e avaliados. Os riscos que foram valorados como intoleráveis e elevados serão dirimidos em primeiro lugar. Ulteriormente dever-se-á proceder à remediação dos riscos valorados como significativos. Finalmente, para os riscos considerados aceitáveis dever-se-á tomar medidas que garantam a sua estabilidade.

A estratégia para tratar o risco passa por evitá-lo quando viável. Quando tal não for possível, deve-se estudar e seleccionar as medidas a empreender através da redução da verosimilhança de ocorrência dos perigos (*e.g.*, aplicação de pregagens e/ou de betão projectado); ou da redução das consequências da eventual materialização dos perigos (*e.g.*, execução dos trabalhos preservando a segurança do pessoal).

Em seguida e de acordo com o desenrolar da obra e das medidas mitigadoras que efectivamente tivessem sido adoptadas, dever-se-ia proceder à respectiva síntese num quadro resumo. Ora o preenchimento deste quadro só seria possível com o acompanhamento de uma obra em tempo real e com o conhecimento efectivo do custo das medidas propostas, mesmo considerando que o princípio ALARP tivesse sido respeitado, o que perante os constrangimentos inerentes à presente dissertação, se torna impossível de concretizar. Como na realidade não se efectuou o acompanhamento de nenhuma obra torna-se demasiado subjectivo avançar com medidas que tivessem eventualmente sido adoptadas no seu desenrolar. Assim e partindo do pressuposto que certas medidas propostas no Quadro 6.18 foram de facto implementadas, avança-se no Quadro 6.19 com algumas hipóteses exemplificativas.

**Quadro 6.18. Síntese das medidas concretas a implementar (excerto do Quadro II.D – Anexo II).**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação a implementar	
	Mitigação	Controlo e observação
1	Remoção dos blocos/fragmentos instáveis; aplicação de pregagens e/ou de betão projectado e/ou malha electrossoldada; adopção de um sistema de drenagem, superficial e/ou profunda eficiente; execução dos trabalhos preservando a segurança do pessoal.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; acompanhamento do comportamento e evolução dos taludes; medição de deslocamentos, caudais e níveis piezométricos, através de instrumentação.
6	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e/ou da cartografia geotécnica do túnel; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento de cambotas, aumento da espessura de betão projectado, aumento da densidade de pregagens e/ou de drenos); previsão atempada do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas de água, pregagens, cambotas, betão, etc.) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; na fase de construção proceder à instalação de secções de convergência, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel; células de pressão total no contacto maciço/sustimento e no próprio sustimento; deformações no interior do maciço (extensómetros); piezómetros para avaliar a presença de água no maciço, bem como, a respectiva pressão imposta.
11C	Prospecção na frente de avanço; adaptação contínua do projecto em função das condições geotécnicas reais do maciço: comprimento do vão/período de auto-sustentação, parcialização da frente e necessidade do sustimento aplicado; em situações mais instáveis aplicar betão projectado na frente prosseguindo a escavação em secção total com 1 metro de avanço, eventualmente com pequeno degrau e avanço na semi-secção superior; previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas, sustimentos) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Acompanhamento, cartografia da escavação e comparação com as situações preconizadas em projecto; controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados; inspecção do sustimento aplicado (registo de aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado); instalação de convergenciómetros, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel.
13C	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e em função do valor de RMR obtido durante a obra; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento e/ou execução de pés de elefante nas cambotas, aumento da espessura de betão projectado, colocação de mais pregagens); previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Verificação das condições das secções escavadas, de forma sistemática, através da aplicação das classificações geomecânicas; instalação de células de pressão total no sustimento; extensómetros para medição de deslocamentos internos; secções de convergência, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel; piezómetros para medição das pressões hidrostáticas exercidas pela água sobre os sustimentos.
1M	---	Inspeções visuais regulares dos reforços aplicados, bem como controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta, para detecção de eventuais sinais de anomalias reveladoras de perigos potenciais.
6M	---	Aferição do redimensionamento do sustimento aplicado através de inspeções visuais regulares bem como controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta, para detecção de eventuais sinais de anomalias reveladoras de perigos potenciais.

Quadro 6.19. Síntese das medidas efectivamente adoptadas.

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação adoptadas	
	Mitigação	Controlo e observação
1	Remoção dos blocos/fragmentos instáveis; pregagens de x m de comprimento distribuídos segundo uma malha de y m por z m; aplicação de betão projectado; sistema de drenagem superficial por valetas e meias canas instaladas em banquetas, nas bermas e nas cristas dos taludes; impedimento da permanência ou circulação de pessoal na área eventualmente afectada pela queda de blocos.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação e comparação com as previsões do projecto; acompanhamento do comportamento e evolução dos taludes; medição de deslocamentos, caudais e níveis piezométricos, através instalação da instrumentação (medidores de fendas, inclinómetros, piezómetros); leitura e interpretação dos resultados.
6	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e/ou da cartografia geotécnica do túnel; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento de cambotas, aumento da espessura de betão projectado, aumento da densidade de pregagens e/ou de drenos); previsão atempada do stock de materiais a disponibilizar em obra (bombas de água, pregagens, cambotas, betão, etc.).	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; células de pressão total no contacto maciço/sustimento e no próprio sustimento; instalação de convergenciómetros em ZG1 – perfis distanciados de x m; medição bimensal nas primeiras seis semanas e, posteriormente, mensal; zonas singulares o espaçamento entre perfis a instrumentar foi inferior a y m. A periodicidade inicial das medições foi de três por semana, durante os primeiros dois meses; medições das deformações no interior do maciço (extensómetros); piezómetros para avaliar a presença de água no maciço, bem como, a respectiva pressão imposta.
11C	Adaptação contínua do projecto em função das condições geotécnicas reais do maciço: comprimento do vão/período de auto-sustentação, parcialização da frente e necessidade do sustimento aplicado; aplicação de betão projectado na frente prosseguindo a escavação em secção total com 1 metro de avanço, eventualmente com pequeno degrau e avanço na semi-secção superior, em situações mais instáveis; previsão do stock de materiais a disponibilizar em obra (bombas, sustimentos).	Acompanhamento, cartografia da escavação e comparação com as situações preconizadas em projecto; controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados; inspecção do sustimento aplicado (registo do aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado); instalação de convergenciómetros, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel.
13C	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e em função do valor de RMR obtido durante a obra; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento e/ou execução de pés de elefante nas cambotas, aumento da espessura de betão projectado, colocação de mais pregagens); previsão do stock de materiais a disponibilizar em obra.	Observação da secção escavada, nomeadamente, o registo de aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado; instalação de células de pressão total no sustimento; piezómetros para medição das pressões hidrostáticas exercidas pela água sobre suportes impermeáveis; instalação de convergenciómetros, em ZG3 – perfis distanciados de z m; medição duas vezes por semana nas primeiras seis semanas e, posteriormente, quinzenal; em zonas singulares o espaçamento entre perfis a instrumentar foi inferior a y m. A periodicidade inicial das medições foi de três por semana, durante os primeiros dois meses.
1M	---	Foram efectuadas inspecções visuais às superfícies tratadas com betão projectado, controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta.
6M	---	Avaliou-se o redimensionamento do sustimento aplicado através de inspecções visuais e dos resultados da instrumentação.

## 6.6 OBSERVAÇÃO, CONTROLO E REVISÃO DOS RISCOS

No tipo de obra em referência e para o método construtivo preconizado, a observação apresenta-se como um complemento essencial à validação dos pressupostos de projecto e da sua adequação às condições encontradas em obra, bem como das adaptações efectuadas, com particular incidência na respectiva segurança e economia. Considerando que algumas das medidas referidas no Quadro 6.18 tinham sido implementadas durante a construção e incluídas num quadro resumo idêntico ao Quadro 6.19, ter-se-ia que proceder à observação e controlo da sua eficácia, bem como à sua revisão. A título exemplificativo avança-se no Quadro 6.20 com algumas considerações que poderiam ser avançadas no âmbito desta etapa da gestão de risco, e tomando como referência as medidas incluídas no Quadro 6.19.

**Quadro 6.20. Síntese da observação e revisão das medidas empreendidas.**

Perigo	Observação e revisão das medidas empreendidas
1	A remoção dos blocos mostrou-se bastante eficaz reduzindo em grande parte o risco envolvido; no entanto admite-se que o reforço da malha de pregagens pudesse ter conduzido a uma solução à partida mais favorável do ponto de vista dos riscos envolvidos; aconselha-se a manutenção do sistema de drenagem superficial; a leitura e interpretação dos resultados da monitorização mostram que as acções empreendidas em boa medida trataram o risco existente; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.
6	Verifica-se que o sustimento tem sido adaptado correctamente às condições geotécnicas encontradas; a previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra tem permitido salvaguardar custos e prazos no reforço do maciço; as medições de convergências têm possibilitado aferir a fiabilidade e segurança dos sustimentos instalados tendo, pontualmente, conduzido ao seu reforço; as mesmas deverão ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.
11C	Para este caso aconselha-se que a parcialização da frente seja continuamente adaptada às condições encontradas; a previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra possibilitou num caso único de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo; o controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados, deve ser mais rigoroso; as medições das convergências deverão ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; o risco deve sofrer nova redução e ser reavaliado após a implementação destas medidas; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta.
13C	Sempre que se verifiquem valores anómalos de deformação, tem-se reforçado a curto prazo o sustimento colocado; a sucessiva adaptação dos sustimentos aplicados tem sido em função da experiência obtida; a observação da secção escavada, nomeadamente, o registo do aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado levou ao reforço pontual do sustimento já aplicado; as medições de convergências devem ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.
1M	Atendendo ao aparecimento de indícios associados a eventuais deslizamentos localizados, foi reforçada a malha de pregagens na zona; as medidas inicialmente preconizadas complementadas com o reforço enunciado permitiram controlar os riscos; não se registou a criação de novos riscos associadas à adopção destas medidas.
6M	As medidas inicialmente preconizadas têm até ao momento permitido controlar os riscos.

## 6.7 COMUNICAÇÃO DOS RISCOS

### 6.7.1 Registo dos riscos geotécnicos

A principal ferramenta de comunicação será constituída pelo RR, cuja primeira versão deverá ser elaborada após a adjudicação da obra e antes do início dos trabalhos, com base nos riscos identificados no projecto e nos riscos que possam resultar, directa ou indirectamente, dos métodos e técnicas construtivas constantes na proposta. O RR será constituído pelo conjunto de documentos relativos à gestão dos riscos que serão disponibilizados, em permanência e nas condições enunciadas e a definir, através da Internet. Este integrará o conjunto das informações organizadas de acordo com os quadros anteriormente apresentados (Quadros 6.6, 6.13, 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20) e presentes no Anexo II, que deverão ser constantemente actualizados.

A consulta permanente de todos os intervenientes no processo em todas as etapas de gestão dos riscos implica a comunicação, em tempo útil, dos resultados da gestão dos riscos, quer a nível interno, quer a nível externo, envolvendo todas ou algumas das entidades interessadas. Essa comunicação assume uma importância fundamental, na medida em que promove um conhecimento dos diferentes perigos identificados, do nível de riscos associado e das medidas de mitigação e de controlo e observação propostas (ou implementadas, quando se trate de medidas de carácter urgente adoptadas no decurso dos trabalhos), permitindo a sua análise crítica e, quando se justifique e seja ainda oportuno, a proposta de novas medidas ou medidas complementares para fazer face aos perigos.

Situações típicas das obras geotécnicas, que certamente ocorrerão com alguma frequência na obra em causa, referem-se a perigos identificados durante a execução da obra que, pela sua natureza, e atendendo aos novos dados de carácter geológico-geotécnico ou hidrogeológico obtidos durante os trabalhos, proporcionam aos Projectistas a oportunidade de, quando informados em tempo útil, refazerem os modelos de comportamento utilizados no âmbito do projecto e, assim, definirem, com maior precisão, os mecanismos associados à materialização dos referidos perigos, estimarem a verosimilhança da sua ocorrência, avaliarem as respectivas consequências e o nível de risco associado e, por conseguinte, preconizarem mais correctamente as medidas de mitigação e de controlo e observação a adoptar e implementar. A comunicação dos resultados em sentido inverso (neste caso, dos

Projectistas para o Empreiteiro) possibilita, pelo menos, a aplicação das medidas preconizadas minimizando os prejuízos decorrentes do facto de ter de enfrentar uma situação inesperada e constitui uma oportunidade.

Posto isto, os aspectos que, na metodologia de gestão de riscos proposta, se consideram particularmente relevantes são os seguintes:

- ✓ Análise crítica dos cenários de risco constantes do projecto, considerando os métodos e as técnicas construtivas a utilizar na execução das obras;
- ✓ Implementação de um RR, a sediar na *Internet*, com um formato normalizado; disponibilização deste registo, devidamente actualizado, a todos os interessados na gestão dos riscos, com níveis de acesso e autorização para proceder a alterações a definir;
- ✓ Realização de reuniões internas regulares (sessões de *brainstorming*) envolvendo o Director Técnico da Empreitada, os responsáveis das frentes de trabalho, os consultores e o especialista em análise de riscos, com vista à verificação dos procedimentos adoptados, à avaliação da eficácia dos respectivos resultados e à identificação de novos riscos que as informações decorrentes dos trabalhos tenham revelado e, quando necessário, à adopção de medidas de mitigação dos referidos riscos;
- ✓ Realização de reuniões externas regulares (sessões de *brainstorming*) envolvendo responsáveis das várias entidades (Dono de Obra e seus consultores, Projectistas, Fiscalização e Empreiteiro) com vista à verificação dos procedimentos adoptados, à avaliação da eficácia dos respectivos resultados, à identificação de novos riscos que as informações decorrentes dos trabalhos tenham revelado e à consequente tomada de decisões.

A metodologia proposta pressupõe a disponibilização dos resultados, em formatos normalizados, na *Internet*, com níveis de acesso e de alteração condicionados pela utilização de palavras-passe. Serão definidos os procedimentos para a formulação de propostas de alteração ou adição de informações e para a respectiva aceitação. Para tal sugere-se que seja criada uma base de dados, uma vez que estas apresentam vantagens como, a gestão de grandes quantidades de informação, potencialidades para armazenar, manipular, editar e

seleccionar vários tipos e volumes de dados, bem como para os analisar, actualizar ou modificar. Além disso permitem (Silva, 2000):

- ✓ Facilidade na consulta por diversos utilizadores, inclusive à distância;
- ✓ Rapidez na pesquisa, reavaliação de dados preexistentes e no processamento de novos dados;
- ✓ Melhoria potencial na qualidade da informação manipulada através da concepção de sistemas para o seu controlo; e
- ✓ Possibilidade de assegurar um apoio mais fundamentado à tomada de decisões.

A informação arquivada pode e deve ser posteriormente reutilizada ou até reinterpretada no âmbito de novos projectos. Os eventuais utilizadores devem, deste modo, contribuir para assegurar a precisão e actualidade dos dados que forem posteriormente adicionados à base de dados.





## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho realizou-se um estudo geral sobre a gestão do risco geotécnico na construção de túneis, perspectivando-se os seus objectivos, os respectivos domínios de aplicação, algumas metodologias de avaliação de riscos, acções de mitigação e de observação e controlo, bem como a sua aplicação a um caso hipotético de estudo.

De seguida referem-se as principais considerações resultantes deste estudo e recomendações para a investigação subsequente neste domínio.

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora as reflexões sobre os riscos geotécnicos envolvidos devessem ser contempladas na generalidade das obras de engenharia, só muito recentemente têm sido feitas abordagens no sentido de quantificar o risco associado às obras geotécnicas, como é o caso dos túneis. O objectivo da gestão dos riscos geotécnicos, *i.e.*, o risco sob a forma de condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas imprevistas ou imprevisíveis, é garantir uma resposta técnica e organizacional atempada para evitar um evento indesejável e garantir um processo de construção contínuo, económico e seguro, de modo a que a qualidade do trabalho realizado não seja afectada. Todo este processo requer o envolvimento do Dono de Obra, do Empreiteiro e do Projectista, desde a fase de estudo prévio até à conclusão da construção. Algumas instituições consagradas, como são o caso da ITA e do ITIG, têm tentado implementar uma série de recomendações e linhas orientadoras no que toca a esta problemática, no entanto ainda não lhes tem sido prestada a devida importância, nomeadamente em Portugal.

Normalmente, é possível antever, com mais ou menos sucesso, o comportamento do maciço durante o avanço da escavação de um túnel; contudo ele não pode ser determinado com exactidão. Por este motivo, o risco geotécnico deve ser gerido durante toda a escavação. A gestão de risco geotécnico em túneis não requer quaisquer métodos ou tecnologias particularmente difíceis. No entanto, exige conhecimentos técnicos no domínio em causa e, na realidade, deve ser efectuada adoptando alguns princípios, que permitem minimizar o risco durante todas as fases da obra e viabilizam uma melhoria na transparência da tomada de decisão. Tudo isto exige o desenvolvimento de um PGR que contemple todas as etapas inerentes ao processo de gestão (identificação, avaliação, alocação, mitigação e observação

e controlo dos riscos). A aplicação do PGR pressupõe que seja sempre efectuado o acompanhamento do túnel e que o projecto seja aferido durante a escavação, constituindo um método dinâmico, com a contínua actualização daquele com os novos parâmetros que vão sendo obtidos em obra.

As primeiras etapas da gestão do risco geotécnico, e também as mais importantes, são a identificação dos perigos presentes no local de construção para os trabalhos a desenvolver (*e.g.*, através de listas de verificação já existentes ou elaboradas para a obra em questão), e a avaliação, que engloba a análise e consequente apreciação dos riscos geotécnicos resultantes daqueles perigos. Para isso e no caso dos riscos se materializarem, é necessário que se efectue uma estimativa dos eventuais custos e/ou alterações no prazo de execução, bem como uma proposta das medidas adicionais de segurança para a respectiva redução dos impactes. No cômputo geral, o risco é expresso pela probabilidade de ocorrência de um efeito indesejável com certas consequências económicas. A definição de risco aceitável/tolerável, deve ser acordada entre todas as partes envolvidas na construção, inclusive deverá estipular claramente quem irá arcar com as consequências de determinado risco. Deste modo, a definição da zona de aplicabilidade do princípio ALARP, é fundamental para dar sustentabilidade às avaliações de riscos, uma vez que permite a apreciação dos riscos analisados e a sua consequente gestão.

A análise do risco é, neste contexto, uma ferramenta muito eficaz para identificar e calcular a dimensão dos efeitos de tipo físico, económico e social que os eventos imprevistos podem produzir durante as fases construtivas. Os benefícios das análises quantitativas são maximizados, na opinião do autor, se se definirem previamente probabilidades de ocorrência para determinados perigos, *i.e.*, com recurso aos dados disponíveis de uma determinada gama de projectos em condições semelhantes ao projecto em referência, o que nem sempre acontece actualmente. Até lá, as análises qualitativas podem e devem ser consideradas mais fiáveis, sendo função da experiência dos especialistas nelas envolvidos, ainda que lhes esteja associada uma maior subjectividade. No entanto, esta é tanto menor quanto maior for o conhecimento geotécnico das características dos maciços e do respectivo comportamento.

Uns dos principais motivos para a não detecção de alguns dos perigos geotécnicos existentes nestas obras são as campanhas de prospecção geotécnica não terem o desenvolvimento

suficiente para o nível de conhecimento adequado ao projecto. Daí que se recomende que sejam atribuídas a tais programas um maior número de verbas e de tempo. Deste modo, é importante que Geólogos e Engenheiros Geólogos façam um uso mais eficaz dos recursos alocados à prospecção do terreno. Os métodos tradicionais podem e devem ser complementados pelo recurso a novas técnicas, como a perfuração dirigida, ou o reforço do uso de outras, nomeadamente a geofísica dentro de furos. Pode ainda recorrer-se à prospecção no desenrolar da construção, tais como sondagens a partir da frente de escavação ou a instalação de dispositivos de prospecção sísmica na cabeça das tuneladoras, como auxílio na antecipação de potenciais problemas geotécnicos. Ainda que se realizem trabalhos de reconhecimento e de prospecção geotécnica detalhados, não é possível conhecer a natureza, estrutura e propriedades dos terrenos com o rigor desejado, para que os túneis possam ser executados em segurança e dentro dos prazos e custos estimados. Deste modo, é irrealista esperar que uma prospecção geotécnica muito extensa elimine totalmente o risco de uma obra; contudo diminuem-se as hipóteses de encontrar imprevistos geotécnicos.

A selecção adequada do método construtivo de um túnel em função das condições geológicas e geotécnicas avançadas em projecto, constitui uma das premissas que mais contribui para reduzir os riscos geotécnicos associados à instabilização do maciço. Aquela deverá basear-se em análises de risco e de decisão. Outras soluções para a redução dos riscos antes da fase construtiva incluem a melhoria das estratégias para os controlar, a elaboração de planos e procedimentos de contingência, a realização de uma análise crítica, revisão e validação do projecto e o aprimoramento de uma cultura de segurança entre Projectistas, Empreiteiros e Donos de Obra. Só então se deverá proceder ao lançamento do concurso para a empreitada da obra.

Também a elaboração de um contrato é um passo fundamental na minimização de custos e de eventuais atrasos no cronograma dos trabalhos. A inclusão de um RGR no contrato e o desenvolvimento de um conjunto de condições de partilha de riscos estão entre as disposições contratuais a serem exploradas para minimizar os potenciais problemas relacionados com condições geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas imprevistas. Cada risco deve ser da responsabilidade da entidade melhor preparada para o gerir, *i.e.*, com menor custos finais. O Empreiteiro deverá assumir os custos previstos no RGR, enquanto o

Dono de Obra assumirá os custos das condições mais adversas, ou não previstas no RGR. Deste modo, assegura-se a redução das incertezas em termos contratuais que servem de fundamento à emergência de futuros conflitos e evitam que apenas o Dono de Obra responda pelas contingências originadas pelas estimativas iniciais, fornecidas pelo Empreiteiro.

Na fase construtiva, a etapa mais importante do processo de gestão é, sem dúvida, a observação e controlo dos riscos, que se pretendem residuais. Esta envolve a implementação das decisões tomadas com base nas informações recolhidas durante a observação do comportamento da obra. A construção de uma obra subterrânea, em particular de um túnel, é uma actividade interactiva que deve atender, entre outros aspectos relevantes: à comparação entre o previsto e o observado (revelado pela escavação e monitorização diária); à modificação e ajuste do projecto inicial à realidade, evoluindo com a obra, através de um processo dinâmico e contínuo, até à conclusão da mesma. As acções correctivas devem ser documentadas e avaliada a respectiva eficácia. Para tal, a aplicação da gestão de risco associada ao MO permite a execução de estruturas subterrâneas com a qualidade, a segurança e o custo pretendidos. Ao mesmo tempo, os eventuais danos nas envolventes à construção são minimizados. Em geral, as actividades de observação estão muito condicionadas pelo factor económico. Contudo e considerando apenas este factor, a sua implementação permite, em muitos casos, mediante um ajuste nos meios, otimizar os projectos do ponto de vista económico e controlar, eficazmente, o risco no decurso das diferentes fases da obra, o que só por si a justifica plenamente.

Posto isto, saliente-se que a análise do risco funciona, em particular, sempre que for implementada por uma equipa constituída por especialistas que intervêm logo a partir das fases preliminares do projecto de uma obra, em estreita colaboração e comunicação com todas as partes envolvidas. O julgamento dos peritos envolvidos, construído na sua larga experiência em ambientes geológicos semelhantes e nos métodos construtivos aplicáveis, auxilia o perspectivar dos problemas de forma adequada e a definição de prioridades para a utilização de recursos e prazos, necessariamente limitados. Aqueles profissionais devem ter um papel activo na identificação de riscos geotécnicos, na avaliação e elaboração dos respectivos planos de mitigação e ainda na actualização do RR.

Por fim, a utilização conjugada do RR com outras ferramentas contratuais, tal como a partilha de risco, permite gerir activa e dinamicamente o risco geotécnico do projecto, com benefícios para a indústria de construção subterrânea, e fornece um alicerce mais sólido para eventuais futuros esforços de parceria entre o Dono de Obra e o Empreiteiro. A prudente utilização do RR facilita a realização de uma auditoria ao projecto em qualquer fase da obra. Durante a construção e para ser eficaz, aquele documento deve ser revisto e actualizado, regularmente (pelo menos quinzenalmente), constituindo um ponto essencial à estreita colaboração entre as entidades contratantes, produzindo deste modo um Dono de Obra bem informado sobre o modo como as mudanças nas condições de terreno terão impactes na obra.

Posto isto, é fundamental que cada obra tenha um PGR, o qual deverá conter um registo de riscos, elaborado especificamente para cada túnel, com o intuito de reduzir os riscos na respectiva construção. Relembre-se que “Nenhum projecto de construção está livre de risco. O risco pode ser gerido, minimizado, partilhado, transferido ou simplesmente aceite, mas não pode ser ignorado” (Latham, 1994 *in* Clayton, 2001).

A dissertação envolveu também um caso de estudo, hipotético, de um túnel de comprimento e diâmetro reduzidos, respectivamente 1500 m e 3,6 m, escavado com recurso a explosivos, num maciço xisto-grauváquico. Ele foi seleccionado com o intuito de proporcionar um grau de complexidade não muito elevado mas que permitisse lidar com as situações mais prováveis a ocorrer em escavações naquele tipo de terrenos. Devido às condições já referidas, não foi possível aplicar uma abordagem com um nível de subjectividade reduzido; no entanto a metodologia proposta é credível e constituirá um contributo relevante para fundamentar futuras gestões de risco geotécnicos a casos reais, visto que foi cumprido o principal objectivo estabelecido: a criação de um modelo tipo para facilitar a aplicação dos procedimentos de gestão de riscos em túneis, na fase construtiva.

## 7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Em termos de desenvolvimentos futuros, propõem-se em seguida algumas linhas orientadoras para ulteriores investigações no domínio em referência, a saber:

- ✓ Concepção de uma base de dados tipo que contemple as listas de verificação e os registos de riscos geotécnicos em túneis, para sistematizar os elementos básicos a

adquirir e serem rapidamente adaptadas a futuras obras em função das respectivas envolventes geológicas e geotécnicas;

- ✓ Prossecução da identificação de cenários de rotura típicos em túneis em função do respectivo enquadramento geológico e geotécnico;
- ✓ Implementação da análise qualitativa apresentada nesta dissertação a novos casos de estudo, reais;
- ✓ Aprofundamento do estudo e elaboração de análises quantitativas de riscos por árvores de falhas (FTA) e/ou de eventos (ETA) a casos de estudo concretos;
- ✓ Investigar a utilização de outras técnicas de análise quantitativa que viabilizem o cálculo das probabilidades e a modelação das incertezas em análises de risco;
- ✓ Criação de uma base de dados de modo a sistematizar as causas dos acidentes ocorridos nos últimos anos em túneis, em todo o mundo, visando contribuir para a sua detecção atempada a médio prazo e relacionando-as directamente com: o contexto geológico-geotécnico, os resultados de observação e os indícios de fenómenos associados à respectiva sequência causal do evento adverso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, E. P. (2005). *Técnicas de Análise de Risco Aplicadas ao Planeamento e Programação de Projectos da Construção Civil*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 163 p.
- Amaral, M. (2006). *Análise dos Resultados de Observação dos Túneis do Metropolitano de Lisboa*. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 57-90.
- Ameratunga, J. (2008). *Geotechnical Risk Management for Underground Works*. Coffey Geotechnics, In conjunction with The University of Melbourne, Australia.
- ASCE (2007). *Geotechnical Baseline Reports for Construction*. The Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council, ASCE, Reston, 62p.
- Ashley, D. B., Diekmann J. E. & Molenaar, K. R. (2006). *Guide to Risk Assessment and Allocation for Highway Construction Management*. Construction Management Expert Technical Group of the Construction Management International Scanning Study Team, FHWA, Alexandria, 72p.
- Azevedo, A. A. (2008). *Proposta Metodológica para Incorporação de Incertezas Geológicas ao Projecto e Construção de Túneis Urbanos*. 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Porto de Galinhas, Brasil, 14p.
- Barbosa, P.F.M. (2008). *Avaliação do Risco em Túneis Rodoviários Extensos em Maciços Rochosos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 121p.
- Barton, N. (2002). *Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 39/2, pp.185-216.
- Bastos, M. (1998). *A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos*. Dissertação de Mestrado em Georrecursos – Área de Geotecnia, Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, pp. 81-104.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251p.
- Brinkman, J. (2008). *Risk Management Applied to Tunnels*. Presentation in Risk management in civil engineering advanced course, LNEC, Lisbon.
- BTS (2003). *The Joint Code of Practice for Risk Management of Underground Works in the UK*. The British Tunnelling Society, first edition, London, 20p. Consultado a 15 de Março de 2010 em: <http://www.britishtunnelling.org.uk/downloads/jcop.pdf>
- Caldeira, L. (2002). *As Análise de Risco e as Incertezas*. In VIII Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, pp. 2295-2311.

Caldeira, L. (2005). *Análises de Risco em Geotecnia*. Aplicação a barragens de aterro. Programa de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica de Solos, LNEC, Lisboa, 248p.

Caspurro, L. & Gomes, A. S. (2000). *Definição de Estratégias para a Observação de Obras Geotécnicas Rodoviárias*. In VII Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, pp. 453-459.

CE 439 (2004). *Observational Methods and NATM*. Chapter 8. Course on Railway and Metro Tunnels. Consultado dia 15 de Junho de 2010 em: <http://www.ce.metu.edu.tr/~ce439/Slideshows/8%20-%20NATM%205-Jan%202004.doc>

CEN (2004). prEN 1997-1. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1, General Rules, 167p.

Chapman, T. J. P. (2008). *The Relevance of Developer Costs in Geotechnical Risk Management*. Foundations: Proceedings of the Second BGA International Conference on Foundations, ICOF2008. Consultado dia 30 de Abril de 2010 em: <http://www.dundee.ac.uk/civileng/icof2008/01%20Chapman%20keynote.pdf>

Chiriotti, E., Grasso, P., Gaj, F. & Giacomini, G. (2004). *O Controlo dos Riscos na Escavação Mecanizada de Túneis Urbanos*. In IX Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, pp. 259-268.

Clayton, C. R. I. (2001). *Managing Geotechnical Risk – Improving Productivity in UK Building and Construction*. Institution of Civil Engineers, London, 80p.

CNPGB (2005). *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens, 1º Relatório de progresso*. Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens, Lisboa, 58p.

Costa, A. L. D. (2008). *Fundamentos para a Avaliação de Risco Sísmico e Geotécnico em Linhas Ferroviárias de Alta Velocidade em Portugal*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, 79p.

Costa, E. A. (2005). *Avaliação de Ameaças e Risco Geotécnico Aplicados à Estabilidade de Taludes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 160p.

Decreto-Lei n.º 278/2009 de 2 de Outubro. Diário da República, 1.ª série — N.º 192. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa.

Ehrbar, H. (2008). *Gottard Base Tunnel, Switzerland Experiences with Different Tunneling Methods*. Seminário Internacional *South American Tunnelling*. In 2º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, São Paulo, 14 p.

Eskesen, S., Tengborg, P., Kampmann, J. & Veicherts, T. (2004). *Guidelines for tunnelling risk management*: International Tunnelling Association, Working Group No. 2. Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 19, nº 3, pp. 217-237, Elsevier.

Essex, R. J. (1997). *Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, Guidelines and Practices*. The Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council, ASCE, Reston, 40 p.



Estrela, M. V. (2008). *Metodologia de análise e controlo de risco dos prazos em projecto de construção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

FHWA (1996). *Geotechnical Differing Site Conditions*. Geotechnical Engineering Notebook, Geotechnical Guideline No.15, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 36 p.

Flor, A. & Roxo, J. (2010). *O Código dos Contratos Públicos e o Método Observacional. Reflexões e Análise Crítica*. Contribuições Recentes para o Projecto, a Construção, a Exploração e a Reabilitação. In XII Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 1927-1932.

Flores, J. R. (2006). *Risk Management in Canadian Tunneling Projects*. Master of Science in Construction Engineering and Management. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Alberta, Edmonton, Canada, 167p.

Freeman, T., Klein, S., Korbin, G. & Quick W. (2009). *Geotechnical Baseline Reports—A Review*. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings. Consultado dia 4 de Maio de 2010 em: [http://www.jacobssf.com/index.php/publications/article\\_view/292/](http://www.jacobssf.com/index.php/publications/article_view/292/)

GEO (2009). *Catalogue of Notable Tunnel Failure, Case Histories (up to December 2008)*. Geotechnical Engineering Office, Hong Kong. Consultado dia 10 de Agosto de 2010 em: <http://www.cedd.gov.hk/eng/publications/reference/doc/HK%20NotableTunnel%20Cat.pdf>

Globo (2007). *Hoje em Fotos*. Edição online de 11 de Julho de 2007. Consultado dia 24 de Fevereiro de 2010 em: [http://oglobo.globo.com/fotos/2007/07/11/11\\_MHG\\_sp\\_metro4.jpg](http://oglobo.globo.com/fotos/2007/07/11/11_MHG_sp_metro4.jpg)

Gomes, A. S. (2010). *Informação oral*. FCT/UNL, Campus de Caparica.

Goodfellow, R. J. F. & Headland, P.J. (2009). *Transfer of a Project Risk Register from Design into Construction: Lessons learned from the WSSC Bi-County Water Tunnel Project*. Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings, SME Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Consultado dia 14 de Junho de 2010 em: [http://www.bv.com/downloads/Resources/Industry\\_Events/RETC/RETC\\_09\\_RiskRegister.pdf](http://www.bv.com/downloads/Resources/Industry_Events/RETC/RETC_09_RiskRegister.pdf)

Grasso, P. (2008). *Risk Management Applied to Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. Seminário Internacional SAT'2008 – South American Tunnelling, São Paulo. Consultado dia 14 de Junho de 2010 em: <http://www.acquacon.com.br/2cbt/apresentacoes/2506/17h30piergiorgiograsso.pdf>

Grasso, P., Chiriotti, E., Xu, S. & Kazilis, N. (2007). *Use of risk management plan for urban mechanized tunnelling projects: From the establishment of the method to the successful practice*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, Prague, pp. 1535-1540.

Grasso, P., Xu, S. & Guglielmetti, V. (2008). *La metodología del PAT como garantía de éxito en los túneles en áreas urbanas*. Revista de Información General de maquinaria y Obras Urbanas, Especialistas en túneles, nº 11 pp. 50-63. Consultado dia 15 de Junho de 2010 em: <http://www.obrasurbanas.es/articulos-de-numero-11-septiembre-octubre-2008>

Grasso, P., Xu, S., Pescara, M., Russo, G. & Repetto, L. (2006). *A methodology for the geotechnical design of long high-speed rail tunnels under the conditions of uncertainty*. Proceedings of China International Symposium on High-Speed Railway Tunnels & Exhibition, 20-21 November 2006, Beijing, China. Paper No.2, 27p.

Grønv, E. (2008). *Water control in Norwegian tunnelling*. Presentation in 2nd Brazilian Conference on tunnels and underground structures. International Seminar South American Tunneling - SAT'2008, São Paulo.

Harer, G. (2009). *Koralm Tunnel – Risk Assessments as an Aid in the Development of Alignment Selection, Cost Estimates and Investigation Works*. Workshop Tunnels for High-Speed Railways, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Henderson, T.O. & Pickles, A.R. (2007). *Underground Construction Projects – Risk sharing in contracts and Geotechnical Baseline Reports*. Special Session on Baseline Reporting, Underground Singapore 2007, Singapore, pp. 185-190.

Highways Agency, Scottish Executive Development Department, National Assembly for Wales Cynulliad Cenedlaethol Cymru & Department for Regional Development Northern Ireland (2002). *Managing Geotechnical Risk*. Design Manual for Roads and Bridges. HD 22/02 in Volume 4, Section 1, Part 2. Consultado dia 27 de Fevereiro de 2010 em: <http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/vol4/section1/hd2202.pdf>

Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Consultado dia 11 Janeiro de 2010 em: <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>

Hoek, E. & Palmeiri, A. (1998). *Geotechnical risks on large civil engineering projects*. Keynote address for Theme I - International Association of Engineering Geologists, September 21 - 25, Vancouver, Canada, 12p.

Hong, E. S., Lee, I. M., Shin, H. S., Nam, S. W. & Kong, J. S. (2009). *Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM*. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 24, nº3, pp. 269-277.

Hung, C. J., Monsees, J., Munfah, N. & Wisniewski, J. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements*. National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, 694 p.

Ikuma, T. (2008). *A case study of the geological risk management using suitable investigation in mountain tunneling*. Proceedings of International Symposium on Society for Social Management Systems 2008, Kochi, 12p.

ITA (2009). *General Report on Convencional Tunnelling Method*. International Tunnelling and Underground Space Association, Working Group Conventional Tunnelling, Report N°002 /

April 2009, 28p. Consultado dia 4 de Maio de 2010 em: <http://www.ita-aites.org/cms/ita-aites-home/latest-news-detail/datum/2009/05/13/ita-report-online-copie-1.html>

ITIG (2006). *A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works*. The International Tunnelling Insurance Group, 28p. Consultado a 15 de Março de 2010 em: [http://www.munichre.com/publications/tunnel\\_code\\_of\\_practice\\_en.pdf](http://www.munichre.com/publications/tunnel_code_of_practice_en.pdf)

Kavvadas, M. J. (2003). *Monitoring and Modelling Ground Deformations During Tunnelling*. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 19p.

Kochen, R. (2009). *Gerenciamento de riscos em obras subterrâneas de engenharia*, Revista Engenharia, nº 595, pp. 100-107. Consultado a 25 de Fevereiro de 2010 em: [http://www.brasilengenharia.com.br/ed/595/Art\\_construcao\\_civil.pdf](http://www.brasilengenharia.com.br/ed/595/Art_construcao_civil.pdf)

Leca, E. & Eskesen, S. D. (2006). *ITA WG 2 – Guidelines for Tunnelling Risk Assessment*. Seoul. Consultado dia 30 de Abril de 2010 em: [http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/OpenSession/OS\\_2006\\_1\\_leca.pdf](http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/OpenSession/OS_2006_1_leca.pdf)

LNEC (2005-2008). *Avaliação de risco em obras geotécnicas*. Plano de Investigação Programada, Risco e segurança. Consultado dia 6 de Abril de 2010 em: <http://www-ext.lnec.pt/pip-2005-2008/rs/01-rs-29.pdf>

Longo, S. & Gama, C. D. (2004). *Análise de Riscos Inerentes às Vibrações Transmitidas às Estruturas*. In IX Congresso Nacional de Geotecnia. Aveiro, 10p.

Lossmann, A. J. & Motycka, B.V. (2007). *Risk Management in Connection with Execution of Underground Structures and Surface Development Securing*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, Prague, pp. 1555-1558.

Maffei, C. E.M., Mello, L. G., Nieble, C. M., Sadowski, G. R. & Takahashi, J. (2008). *As causas do acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo*. Revista Técnica, ed. 138. Consultado dia 5 de Março de 2010 em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/138/as-causas-do-acidente-da-estacao-pinheiros-da-linha-4-102715-1.asp>

Matos, A. C. & Pinto, P.L. (2004). *Introduction*. Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnel. Aveiro, Portugal. Consultado dia 24 de Fevereiro de 2010 em: <http://www.dec.uc.pt/georisk2004>

Maxwell, A. & Naing T. (2006). *Urban Protection and Observational Tunnel Construction using Effective Construction Information Management*. International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, 2-4 February, Bangkok, Thailand, pp. 271-280.

MIT Portugal (2010). *Portuguese Student at MIT Develops Risk-Assessment Methodology That Might Help Prevent Tunnel Accidents*. Edição online de 27 de Janeiro de 2010. Consultado dia 6 de Abril de 2010 em: <http://www.mitportugal.org/latest/portuguese-student-at-mit-develops-risk-assessment-methodology-that-might-help-prevent-future-tunnel-accidents.html>

Morano, C. A. R., Martins, C. G. & Ferreira, M. L. R. (2006). *Aplicação das técnicas de identificação de risco em empreendimentos de E & P*. Engevista, vol. 8, nº 2, pp. 120-133.

Munfah, N. (2007). *Contracting issues for conventional tunnelling*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises, London, pp. 1559-1564.

Munich Re Group (2004). *Underground Transportation Systems - Chances and Risks from the Reinsurer's Point of View*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Germany, 64p. Consultado dia 24 de Fevereiro de 2010 em: <http://www.munichre.com/en/publications/default.aspx?id=610>

Negro, A. & Queiroz, P. (2010). *Antecipação, Auscultação e Avaliação do Comportamento de Túneis em Solo*. Conferências Especiais, in XII Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 13-40.

Neto, F. R. & Kochen, R. (2000). *Segurança, Ruptura, e Colapso de Túneis Urbanos em NATM*. Revista Engenharia, Artigo: Túneis, nº 540, pp. 55-62. Consultado dia 23 de Abril de 2010 em: <http://www.geocompany.com.br/ftp/Artigo8.pdf>

O estado de São Paulo (2008). *Metrô-SP ignorou recomendações técnicas para Linha 4*. Edição online de 29 de Abril 2008. Consultado dia 27 de Fevereiro de 2010 em: [http://www.geocompany.com.br/ftp/metro\\_linha4.pdf](http://www.geocompany.com.br/ftp/metro_linha4.pdf)

Oliveira, C.S. (1977). *Sismologia, sismicidade e risco sísmico*. Aplicação em Portugal. Relatório, Proc. 36/11/4394, LNEC, Lisboa.

Osborne, N.H. & Lim, W.B. (2007). *The Realignment of Nicoll Highway Tunnels, a Risk Management Approach*. Underground Singapore 2007, Singapore, pp. 46-51.

Parker, H. W. (2004). *Planning and Site Investigation in Tunnelling*. 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Seminário Internacional South American Tunnelling. São Paulo. Consultado dia 23 de Abril de 2010 em: <http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ConfPapersExCo/74.PDF>

Patel, D., Nicholson, D., Huybrechts, N. & Maertens, J. (2007). *The Observational Method in Geotechnics*. Consultado dia 8 de Junho de 2010 em: <http://www.arup.com/assets/download/41A6ACB0-DD6E-06AC-F7C03C57BF321BA5.pdf>

Pimenta, L. (2008). *Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro*. Tese de doutoramento. Instituto Superior Técnico/Universidade Técnica de Lisboa, 534p.

Pöschl, I. & Kleberger, J. (2004). *Geotechnical Risk in Rock Mass Characterisation – A Concept*. Course on Geotechnical Risks in Rock Tunnelling, Aveiro, Portugal, 11p.

Powell, D.B. & Silvertown, T. (2003). *Managing Risk on Major Tunnelling Contracts*. Conference in Mumbai – Paper – November, 9p.

Revista Técnica (2008). *Debate sobre acidente reúne IPT e Consórcio Via Amarela*. Edição online de Setembro de 2008. Consultado dia 27 de Maio de 2010 em: <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/138/debate-sobre-acidente-reune-ipt-e-consorcio-via-amarela-102146-1.asp>

RSAAEP (1983). *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Lisboa: Imprensa Nacional, Casa da Moeda, E.P.

Santos, R. (2006). *Enquadramento das análises de riscos em Geotecnia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil, FCT-UNL, Lisboa, 281p.

Santos, R., Caldeira, L. & Serra, J. (2008). *Aplicação da FMEA/FMECA a uma Barragem de Retenção de Rejeitados*. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia, Geotecnia, Nº114, pp.113-142.

Schubert, P. (2004). *Geotechnical Risk Management in Tunnelling*. Course on Geotechnical Risk in Rock Tunnels. Aveiro, 12p.

Schubert, W. (2007). *Geotechnical Safety Management on Site*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, Prague, pp. 1603-1608.

Seidenfuß, T. (2006). *Collapses in Tunnelling*. Master Degree Foundation Engineering and Tunnelling, Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Germany, pp. 16-81.

Šejnoha, J., Jarušková, D., Špačková, O., & Novotná, E. (2009). *Risk Quantification for Tunnel Excavation Process*. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 58, pp. 393 – 401.

Serra, J. B., Lamas, N. L., Muralha, J. & Vieira, A. (2009). *Avaliação de riscos geotécnicos em túneis para a tomada de decisão de prospecção geotécnica*. Seminário, aspectos geotécnicos do projecto, construção, exploração e análises de risco em obras subterrâneas. LNEC, Lisboa.

Shahriar, K., Sharifzadeh, M., & Hamidi, J. K. (2008). *Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions*. Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 23, nº 3, pp. 318 – 325.

Silva, A. P. F. (2000). *Cartografia geotécnica do concelho de Almada e o sistema de informação Geo-Almada*. Dissertação de Doutor em Geotecnia, na especialidade de Geologia de Engenharia, FCT-UNL, Lisboa, pp. 55-90.

Silverton, T.R., Thomas, A.H. & Powell D.B. (2004). *Risk-Based Design using Numerical Modelling*. Mott MacDonald Ltd, Croydon, UK, 6p.

Sousa, R. L. (2010). *Risk Analysis for Tunneling Projects*. PhD thesis in the field of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 589p.

Staveren, M. T. V. (2006). *Uncertainty and ground conditions: a risk management approach*. Butterworth Heinemann, Elsevier Publishers, Oxford. 321p.

Staveren, M. T. V. (2007). *Extending to Geotechnical Risk Management*. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai Tongji University, China, 12p.

TGN24 (2009). *Site Investigation for Tunnel Works*. GEO Technical Guidance Note Nº 24 Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong, Special Administrative Region, 9p.

TGN25 (2009). *Geotechnical Risk Management for Tunnel Works*. GEO Technical Guidance Note Nº 25, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong, Special Administrative Region, 10p.

Thomas, A. H. & Banyai, J.P. (2007). *Risk Management of the Construction of Tunnels using Tunnel Boring Machines (TBMs)*. Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises – Proceedings of the World Tunnel Congress 2007 and 33rd ITA/AITES Annual General Assembly, Prague, pp. 1623-1618.

United States Coast Guard (2000a). *Risk-Based Decision-Making Guidelines - Volume 3, Procedures for Assessing Risks, Applying Risk Assessment Tools. Chapter 4 — Checklist Analysis*. Consultado dia 31 de Março de 2010 em: [http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM\\_Files/PDF/RBDM\\_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2004.pdf](http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM_Files/PDF/RBDM_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2004.pdf)

United States Coast Guard (2000b). *Risk-Based Decision-Making Guidelines - Volume 3, Procedures for Assessing Risks, Applying Risk Assessment Tools. Chapter 11 — Fault Tree Analysis (FTA)*. Consultado dia 31 de Março de 2010 em: [http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM\\_Files/PDF/RBDM\\_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2011.pdf](http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM_Files/PDF/RBDM_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2011.pdf)

United States Coast Guard (2000c). *Risk-Based Decision-Making Guidelines - Volume 3, Procedures for Assessing Risks, Applying Risk Assessment Tools. Chapter 12 — Event Tree Analysis (ETA)*. Consultado dia 31 de Março de 2010 em: [http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM\\_Files/PDF/RBDM\\_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2012.pdf](http://www.uscg.mil/hq/cg5/cg5211/docs/RBDM_Files/PDF/RBDM_Guidelines/Volume%203/Volume%203-Chapter%2012.pdf)

USNC/TT (1984). *Geotechnical Site Investigations for Underground Projects*. U.S. National Committee on Tunneling Technology, National Research Council, Washington, D.C.

Vieira, G. D., Costa, R., Cruz, J. S. & Vieira, C. (2010). *Túneis do Troço 98º da Linha Vermelha do ML Projecto e Acompanhamento da obra*. 1º Encontro de Jovens Geotécnicos, in XII Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pp. 2335-2344.

Wagner, H. (2006). *Risk Evaluation and Control in Underground Construction*. Presentation in International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling. Bangkok, Thailand. Consultado dia 24 de Março de 2010 em: <http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ConfPapersExCo/Bgk2006.pdf>

Wagner, H. & Knights, M. (2006). *Risk Management of Tunnelling Works*. Presentation in Workshop on safety in tunnels and underground structures. Riyadh. Saudi Arabia. Consultado dia 31 de Março de 2010 em: [http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/Organisation/Members/MemberNations/SaudiArabia/PresentationsRyadh2006/S3\\_10.pdf](http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/Organisation/Members/MemberNations/SaudiArabia/PresentationsRyadh2006/S3_10.pdf)

Yoo, W. (2006). *Korean Risk Management Practices : a Contractor's Perspective*. ITA Open Session, ITA-AITES World Tunnel Congress 2006 & 32nd General Assembly Seoul, Korea, 22 – 27 April 2006. Consultado dia 14 de Junho de 2010 em: <http://www.ita-aites.org/cms/ita-aites-home/publications/ita-wtc-open-sessions/risk-management.html>

Zhou, Y.X. & Cai, J.G. (2007). *Managing Geological Risks in a Rock Cavern Project*. Underground Singapore 2007, Singapore, pp. 176-184.





## **ANEXOS**



**ANEXO I – PRINCIPAIS PERIGOS GEOTÉCNICOS E RISCOS RELATIVOS AO  
MÉTODO CONSTRUTIVO EM TÚNEIS**



**Quadro I.A – Principais perigos geotécnicos.**

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs. ( <sup>5</sup> )
<b>Condições mistas devido a variações estruturais/ litológicas e/ou geomecânicas na frente de escavação</b>	Zonas de transição entre terreno rijo/brando e brando/rijo; situação em que parte da frente é em rocha e a restante é em solo; alternância entre rocha sã e rocha meteorizada; solos granulares não coesivos e coesivos; blocos de rocha rija numa matriz mais branda (inclusões); uma vez exposta a face do túnel pode apresentar comportamentos diferentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prospeção geofísica (resistividade eléctrica e sísmica de refração);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (sondagens carotadas).</li> </ul>			
<b>Abrasividade/ dureza da rocha</b>	O quartzo está entre os minerais mais abrasivos; das rochas que contém grande quantidade de quartzo na sua composição podem-se destacar o granito, o quartzito, o arenito, etc.; estas oferecem grande resistência ao corte e provocam desgaste elevado nos bits das ferramentas de perfuração para desmonte com explosivos e nos discos de corte das tuneladoras utilizadas na escavação de túneis em rocha.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Recolha de amostras de sondagens ao longo do alinhamento para ensaios de resistência à compressão uniaxial, tracção e dureza Cerchar e abrasividade;</li> <li>✓ Avaliação do desgaste nos discos de corte das TBM e nos bits das ferramentas de perfuração dos furos para desmonte com explosivos;</li> <li>✓ Determinação da percentagem de sílica em amostras recolhidas.</li> </ul>			
<b>Taludes instáveis</b> (deslizamento de volumes de detritos ou quedas de blocos nos taludes envolventes aos emboquilhamentos do túnel)	Declive pode ser elevado; encosta pode ser naturalmente instável mesmo sem qualquer perturbação provocada pela construção; noutras situações, o túnel pode introduzir mudanças nas condições de estabilidade da encosta, constituindo uma área de potenciais quedas; condições das águas subterrâneas também podem mudar; em alguns casos, fenómenos naturais, como deslizamentos de solo, avalanches de neve, queda de blocos, podem ser as razões do colapso, deformação ou destruição de secções ou emboquilhamentos do túnel.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Análise cinemática das probabilidades de queda dos blocos ao longo da encosta e a estimativa das suas trajectórias;</li> <li>✓ Prospeção geofísica (leques sísmicos na zona dos emboquilhamentos, em furos de sondagem; sísmica de refração e resistividade eléctrica);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (estudo dos depósitos de vertente através de valas; sondagens carotadas; sondagens horizontais nos emboquilhamentos);</li> <li>✓ Instrumentação (inclinómetros, alvos reflectores).</li> </ul>			
<b>Solos moles, expansivos</b>	Ocorrência principalmente em túneis de baixo recobrimento; Solo mole com fraca capacidade de efeito de arco e baixa resistência ao corte; provocam assentamentos maiores na frente de escavação.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prospeção geofísica (resistividade eléctrica);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (sondagens);</li> <li>✓ Instrumentação (inclinómetros, extensómetros, convergenciómetros, marcas topográficas à superfície).</li> </ul>			

<sup>5</sup> Observações

Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Sismicidade do local</b>	Zonas tectonicamente activas; Amplificação do movimento do solo ou liquefacção em determinados solos granulares soltos e saturados, geralmente arenosos devido aos sismos; facilita processos de erosão, com risco de transporte sólido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estudo da sismicidade instrumental e histórica do local;</li> <li>✓ Caracterização dinâmica dos solos (litologia, espessura, densidade e consistência) e rochas;</li> <li>✓ Ensaios de penetração SPT e CPT para determinar resistência à liquefacção em solos granulares;</li> <li>✓ Análise granulométrica de solos granulares.</li> </ul>			
<b>Obstruções</b> (blocos, zonas cimentadas (inclusões), antigas fundações (por estacas), outras instalações subterrâneas, vestígios arqueológicos, etc.)	Especialmente em túneis urbanos; Localização muitas vezes incerta e difícil de detectar; São frequentemente eventos isolados; Os blocos podem ser de vários tamanhos e, normalmente, têm resistência mais elevada do que o terreno circundante, levando a problemas de desmonte.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Inventário das fundações e estruturas quer recentes, quer antigas, ao longo do alinhamento do túnel;</li> <li>✓ Prospekção geofísica (geoelectrica, electromagnética) para detectar estruturas enterradas;</li> <li>✓ Prospekção mecânica (sondagens de grande diâmetro);</li> <li>✓ Ensaios de resistência à compressão uniaxial e de abrasividade nos blocos.</li> </ul>			
<b>Presença de gases explosivos ou venenosos</b> (e.g., metano, sulfeto de hidrogénio, dióxido de carbono, radão) <b>ou outros químicos agressivos</b>	Gases naturais, raramente encontrados na construção de túneis; quando ocorrem representam um perigo que pode infligir graves consequências; frequentemente encontrados em áreas inesperadas e difíceis de detectar; bolsas contendo possíveis gases explosivos (e.g., metano, originado pela degradação termomecânica de material orgânico a profundidade grande, associado à formação do carvão, hidrocarbonetos); mais perto da superfície encontrado em turfas, argilas e siltes orgânicos; menos denso, procura um caminho até à superfície do solo através de estratos permeáveis; é libertado na superfície ou fica retido numa armadilha geológica (falhas, dobras, domas salinos); pode ser encontrado a muitos quilómetros de distância da sua origem em formações distintas da sua fonte (granitos, arenitos, argilitos, calcários, etc.); metano forma uma mistura explosiva quando misturado com o ar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Inventário das condições geológicas dos túneis construídos na região;</li> <li>✓ Interpretação geológica e hidrogeológica;</li> <li>✓ Prospekção geofísica para avaliar a existência de armadilhas de gás nas formações geológicas;</li> <li>✓ Prospekção mecânica (sondagens em avanço);</li> <li>✓ Medição do teor de gás, em amostras de ar a partir de poços; instalação de sondas especiais em furos de sondagem para verificar, periodicamente, o tipo, concentração e pressão do gás e se são explosivos ou não;</li> <li>✓ Recolha de amostras de água subterrânea (possível fonte de gás e para estudar a sua reacção com ele).</li> </ul>			

Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Grau de meteorização/ erosão da rocha</b>	Desintegração física ou decomposição química da rocha; influência da água e/ou da temperatura; redução da resistência das formações rochosas; processo mais acentuado ao longo de descontinuidades; pode ter extensão até grande profundidade originada pela percolação da água subterrânea; bolsadas de alteração ocorrem em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares e geralmente contêm água, podendo estar sob elevadas pressões hidrostáticas; fenómenos de erosão interna ( <i>piping</i> ) e erosão ao longo de planos de cisalhamento, em diques graníticos desintegrados;	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prospeção geofísica (perfis sísmicos de refração e resistividade eléctrica), para determinar a espessura de alteração;</li> <li>✓ Furação destrutiva na frente associadas a diafragmas.</li> </ul>			
<b>Estado de tensão <i>in situ</i></b>	Pode ser induzido pelo peso (carga) do maciço acima do túnel, ou por actividade tectónica; concentração de tensões naturais no maciço numa determinada região ou local e que poderá causar instabilidade aquando da escavação do túnel; associada a rochas com elevada dureza a grande profundidade (estado de tensão <i>in situ</i> muito elevado); razão tensão/resistência determina a extensão ou o grau de deformação, que poderá levar ao colapso; se a tensão for muito maior do que a resistência, origina colapsos locais ou de maior dimensão; poderá causar fenómenos de explosão de rocha (em rochas muito duras, associadas à elevada tensão <i>in situ</i> devido ao grande recobrimento, consequente confinamento e posterior descompressão do maciço, após escavação).	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Zonas com tectónica activa ou com concentração de tensões;</li> <li>✓ Variação resistência/deformação (aumento/diminuição);</li> <li>✓ Ensaios STT (defómetro tridimensional) em furos de sondagem;</li> <li>✓ Ensaios de fracturação hidráulica a grande profundidade;</li> <li>✓ Métodos de sobre-carotagem;</li> <li>✓ Cartografia geotécnica;</li> <li>✓ Ensaio de resistência à compressão uniaxial (RCU).</li> </ul>			
<b>Zonas de falha</b>	As falhas são zonas do maciço fortemente alterado, pelo movimento da rocha, que apresentam condições de estabilidade muito inferiores ao maciço rochoso envolvente; exibem deslocamento de massas ao longo de um plano de fractura; dimensão regional ou local; nos planos de falha é comum a ocorrência de estrias geradas pelo atrito, o que auxilia a sua identificação e classificação; estas zonas de fraqueza poderão conter grandes volumes de água, se não forem preenchidas, <i>e.g.</i> , com material argiloso; caixa de falha pode ter várias espessuras e conter, materiais fracos e esmagados como: farinha de falha, milonitos, rocha esmagada, brecha de falha, fragmentos angulares, inclusões de rocha às vezes de grandes dimensões ou outros materiais (argila, areia, etc.); a tensão diferencial produz rotura; são zonas com baixa resistência ao corte e de elevada permeabilidade e pressão de água; falhas recentes podem ser sismicamente activas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cartografia de superfície, fotografia aérea;</li> <li>✓ Prospeção geofísica específica (perfis de resistividade eléctrica, sísmica entre furos de sondagem próximos, sísmica de refração e de reflexão e tomografia sísmica);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (sondagens a partir da superfície (inclinadas ou verticais) ou da frente de escavação em avanço (horizontais); execução de galerias piloto; perfuração direccionada; trincheiras; sondagens geoelectricas perpendiculares ao plano de falha para estudar evolução em profundidade);</li> <li>✓ Índícios (lavagem de finos, entrada de água a pressão elevada, etc).</li> </ul>			

Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Descontinuidades</b> (diaclasses, planos de estratificação, foliação, xistosidade, fissuras, fracturas, etc.)	Representam fraquezas estruturais em maciços rochosos uma vez que são superfícies de baixa resistência e com fracas condições mecânicas; não exibem deslocamento significativo; ocorrem normalmente em conjuntos paralelos uns aos outros, com várias famílias dependendo do tipo de rocha (e.g., calcários, granitos, basaltos); frequência e orientações relacionadas com a natureza do campo de tensões; geralmente associadas à presença de dobras e falhas; quando dois ou mais sistemas se cruzam pode haver formação de blocos, cunhas de pequenas ou grandes dimensões potencialmente instáveis se tiverem orientação desfavorável; diaclasses à superfície são geralmente semelhantes às encontradas nos emboquilhamentos do túnel, mas o seu desenvolvimento em profundidade pode ser diferente, uma vez que à superfície podem ser originadas devido a meteorização (provocando ciclos de expansão e contracção) e não devido a fenómenos estruturais; os planos de estratificação e foliação são estruturas planares adquiridas durante a formação das rochas sedimentares e metamórficas, respectivamente, podendo constituir-se em planos potenciais de rotura devido à sua menor resistência; todas estas descontinuidades funcionam como uma barreira podendo facilitar o fluxo de água ao longo delas; a sua orientação ao longo do alinhamento do túnel ou em determinadas secções, pode induzir forte instabilidade.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cartografia de superfície;</li> <li>✓ Estudo da compartimentação do maciço à superfície por observação visual (orientação, espaçamento, continuidade, abertura, enchimento, rugosidade, etc.) e, em profundidade, através do estudo dos tarolos das sondagens, das paredes e tecto do túnel;</li> <li>✓ Prospekção geofísica (resistividade eléctrica; sísmica de refração; sísmica entre furos para avaliar grau de fracturação e continuidade litológica);</li> <li>✓ Prospekção mecânica (sondagens com RQD);</li> <li>✓ Ensaios de deslizamento de diaclasses.</li> </ul>			
<b>Dobras</b>	Forma comum de deformação de maciços rochosos; existem em diferentes escalas; são zonas que apresentam más condições mecânicas; designadas de acordo com a convexidade em antifoma, se esta estiver voltada para cima e em sinforma se estiver voltada para baixo; zonas sujeitas a tensões elevadas, associadas ao dobramento flexural das rochas, suficiente para causar explosão de rocha, durante a escavação (i.e., devido ao alívio de tensões, nas imediações do túnel recém escavado); são armadilhas estruturais de retenção de gás ou de água; dobras com elevada distorção podem representar materiais com comportamento plástico frequente em rochas metamórficas ou mais brandas; rochas mais duras são propensas à abertura de planos de fractura nas regiões de maior dobramento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Consulta bibliográfica;</li> <li>✓ Inspekção visual;</li> <li>✓ Trabalhos de cartografia de superfície e complexa interpretação dos dados;</li> <li>✓ Prospekção geofísica (resistividade eléctrica);</li> <li>✓ Ensaios laboratoriais de resistência à tracção para estudar pressões de descompressão do maciço.</li> </ul>			



Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Solos grosseiros/soltos, em lentículas ou bolsadas</b>	Solos granulares, como areia limpa e solta, cascalho, etc.; podem ocorrer em lentículas; a coesão é nula podendo por vezes, quando o teor em água é muito baixo, fornecer uma coesão aparente temporária, imediatamente após a escavação da frente do túnel devido às forças capilares ou pressões intersticiais negativas, que desaparecem quando a areia seca, começando a haver erosão; drenagem e fenómenos erosivos destas zonas podem provocar colapsos com assentamentos até à superfície; os mais problemáticos são as areias finas de granulometria uniforme; muitas vezes estes solos encontram-se saturados; presença de água pode promover fenómenos de liquefacção quando perturbados pela construção.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Prospeccção mecânica (sondagens a partir da frente de escavação);</li> <li>✓ Ensaios de identificação e caracterização geotécnica no laboratório, e de Lefranc no terreno para determinar permeabilidade do material;</li> <li>✓ Instrumentação (instalação de piezómetros).</li> </ul>			
<b>Água subterrânea</b> (pressão e fluxo elevados; fluxo de água através de zonas permeáveis e porosas ou confinado através de fracturas, zonas de esmagamento, cavidades cársicas, ou de anomalias, (rio subterrâneo), etc. águas subterrâneas contaminadas/salinas/corrosivas)	Grande problema na construção de túneis; pode ocorrer em quase todos os tipos de terreno; tipicamente encontrada em formações aquíferas, rochas permeáveis e porosas (arenitos) ou então fracturadas e/ou fissuradas (granitos), formações cársicas (calcários); pode formar cavidades quando associada a terrenos com condições fracas (solto); afecta o desempenho mecânico do maciço; água sob pressão nas fracturas das rochas reduz a tensão normal efectiva entre as superfícies de fractura e portanto reduz a resistência ao corte (cisalhamento) que pode ser mobilizada por atrito; pressão hidrostática, caudal, e composição química influencia o túnel em todas as fases; pressões hidrodinâmicas reduzem a estabilidade da frente do túnel; durante a escavação certos gradientes hidráulicos podem causar, erosão de solos soltos ou lavagem de material de enchimento de descontinuidades; causa amolecimento de solos argilosos, siltosos, ou de rochas como argilitos, margas o que poderá levar à entrada de água e lama para o interior do túnel; provoca uma mudança nas propriedades físicas do terreno, como, coesão, plasticidade, e induz tendência para a expansão; a ocorrência de águas ácidas está directamente relacionada com a presença de sulfuretos na rocha que, uma vez expostas ao meio ambiente geram ácido sulfúrico o qual, por sua vez, baixa drasticamente o pH das águas, tornando-as altamente corrosivas e letais aos seres vivos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cartografia de superfície (observação de poços profundos; inventário de poços, nascentes, linhas de água, etc.);</li> <li>✓ Prospeccção geofísica (resistividade eléctrica ou sísmica de refração para detectar a posição do nível freático, em maciços brandos);</li> <li>✓ Prospeccção mecânica e ensaios (galerias piloto; sondagens com ensaios <i>in situ</i> para determinar permeabilidade dos terrenos, ensaios do tipo Lugeon para maciços rochosos e Lefranc para solos; ensaios de bombagem em furos para caracterizar o aquífero (permeabilidade, transmissividade, coeficiente de armazenamento));</li> <li>✓ Análises químicas para estudar composição.</li> <li>✓ Modelação de águas subterrâneas;</li> <li>✓ Instrumentação (piezómetros em furos de sondagem colocados de preferência antes da construção, para medir nível freático e as suas oscilações, bem como características do escoamento da água subterrânea, regime de pressão intersticial, direcção do fluxo e caudais; sistema de monitorização em tempo real, para medir pressões intersticiais e sua variação, exercidas sobre o suporte).</li> </ul>			

Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).

Perigo	Características principais	Deteção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Cavidades cársicas</b>	Podem ser consideradas obstáculos naturais; rochas solúveis; principalmente maciços calcários e rochas afins (dolomitos, margas); dissolução do $\text{CaCO}_3$ origina cavernas, sumidouros, etc.; associadas a zonas de fraqueza (falhas, fracturas) onde a percolação da água permite alargar esses planos e formar cavidades de vários tamanhos, formas e extensões e a pequenas ou a grandes profundidades; podem estar preenchidas com água, lama, cascalho ou combinação dos 3; cavidades preenchidas com material argiloso podem deixar passar pouca água, contudo essa quantidade de água pode aumentar progressivamente à medida que se dá a lavagem do preenchimento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estudo hidrogeológico do aquífero cársico (história geológica - evolução tectónica e paleogeográfica, constituição de modelos hidrogeológicos);</li> <li>✓ Prospeção geofísica (resistividade eléctrica, geoelectrica, potencial espontâneo em furos de sondagem, microgravimetria, georadar, magnetometria; sísmica entre furos);</li> <li>✓ Prospeção mecânica (sondagens a partir da superfície ou em avanço (i.e., a partir da frente de escavação) com grande comprimento e distribuídas na face do túnel (idealmente 3 furos); execução de galerias piloto).</li> </ul>			
<b>Fluência</b>	Deformação do terreno relacionada com fenómenos de grande tensão que ocorrem em torno do túnel; este fenómeno ocorre geralmente na presença de água em rochas de fraca qualidade e em túneis a grande profundidade; dá-se quando a resistência à compressão não confinada da rocha é menor do que o aumento da tensão tangencial (i.e., altas convergências e baixas resistências); ocorre em solos fracos (argilas moles), e em materiais rochosos com comportamento plástico (xistos argilosos), e semi-plástico, sensíveis à deformação a níveis de tensão relativamente baixos que, sob a acção da gravidade e/ou de efeitos tencionais em redor da abertura do túnel, podem-se deslocar para o interior do mesmo, por vezes, sem que o aumento de volume seja perceptível; os efeitos da deformação do terreno são evidentes durante a escavação, com a fluência a começar a produzir efeitos na frente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ensaios de identificação e caracterização física;</li> <li>✓ Controlo da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, dentro dos limites aceitáveis;</li> <li>✓ Modelos empíricos, semi-empíricos ou teórico-analíticos para avaliar o potencial de fluência em maciços rochosos;</li> <li>✓ Índícios (deformações excessivas, assentamentos elevados, danos em edificações próximas, leituras de instrumentação anómalas/elevadas, não estabilizadas);</li> <li>✓ Instrumentação (convergenciómetros).</li> </ul>			
<b>Terreno contaminado</b>	Por exemplo, devido à infiltração de lixiviados de aterros sanitários; devem ser consideradas as preocupações ambientais com o terreno contaminado, o seu impacto nas actividades de construção civil (higiene e segurança), e as implicações nos custos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sondagens e análises químicas à água e ao solo.</li> </ul>			

**Quadro I.A - Principais perigos geotécnicos (continuação).**

Perigo	Características principais	Detecção do Perigo	Sim	Não	Obs.
<b>Terrenos expansivos/retrácteis</b>	Necessárias duas condições: minerais argilosos não hidratados e água livre; ocorre tanto em rochas como em solos, quando o terreno aumenta de volume (expansão) devido à absorção de água; comportamento geralmente associado a materiais plásticos, solos argilosos ou rochas ricas em minerais argilosos; material de enchimento (caixa de falha), argilitos, argilo-siltitos e rochas altamente alteradas, piroclásticas e micáceas; geram-se deslocamentos para o interior do túnel; fenómeno de expansibilidade é lento, podendo levar períodos de tempo significativos até que se verifique uma deformação notável; após secagem dá-se o fenómeno contrário (retracção), com abertura de fissuras; vulgarmente confundido com fluência porque ambas as condições estão frequentemente presentes ao mesmo tempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ensaios de identificação e caracterização física; ensaios de absorção de água; teste de imersão de uma amostra de rocha num recipiente com água, verificando se esta se desintegra);</li> <li>✓ Instrumentação (células de pressão no suporte, convergenciómetros);</li> <li>✓ Indícios (valores anómalos nas células de pressão).</li> </ul>			
<b>Temperatura</b>	O gradiente geotérmico é diferente em diversos lugares; em média é de um grau centígrado por cada 100 m de profundidade; só faz sentido falar deste perigo em túneis profundos ou em zonas vulcânicas; com actividade geotérmica ou em zonas com temperaturas tropicais; o aquecimento de um bloco de rocha geralmente induz um estado triaxial de tensões de tracção dentro da mesma; as tensões de tracção induzidas pelo aquecimento resultam muitas vezes na formação de fissuras na rocha intergranulares e intragranulares, microcavidades, grande diferença entre a resistência à tracção e à compressão, etc.; as propriedades mecânicas da rocha são alteradas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Instrumentação (termómetros).</li> </ul>			

**Quadro I.B – Principais riscos geotécnicos relativos ao método construtivo.**

Risco	Método	Sim	Não	Obs.
<b>Deterioração do maciço remanescente</b> Sobreescavação e sobrefracturação, com o consequente aumento da permeabilidade do maciço.	Explosivos			
<b>Redução do tempo de auto-sustentação</b> Devido à cobertura reduzida e/ou comprimento do vão não suportado excessivo e/ou ocorrência de singularidades geológicas (e.g., zonas de falha), descompressão anormal do maciço, sustimento insuficiente nas proximidades da frente de escavação, inadequada parcialização da frente.	Ataque pontual <sup>6</sup> e explosivos			
<b>Rotura (soleira ou tecto) ou empolamento (soleira)</b> Túneis associados a pressões elevadas de ar comprimido, lamas bentoníticas, ou tratamentos por injeção de caldas.	TBM <sup>7</sup> de ar comprimido, de lamas bentoníticas ou tratamentos por injeções.			
<b>Efeitos potenciais do projecto no meio ambiente</b> Assentamentos, alterações no escoamento da água subterrânea ou vibrações excessivas, causando danos nas instalações vizinhas ou perturbação de seres vivos.	Todos <sup>8</sup>			
<b>Projecção de material (partículas e/ou blocos)</b> No emboquilhamento do túnel ao longo do seu alinhamento ou em áreas com baixo recobrimento devido a explosões.	Explosivos			
<b>Subsidência excessiva do terreno / deslocamento lateral</b> ✓ Devido ao rebaixamento/afluxo de água subterrânea causado pela utilização de um método de construção inadequado, tratamento inadequado do terreno, deficiente controlo da água subterrânea ou considerações inadequadas quanto às alterações do estado de tensão do terreno ou no regime de percolação. ✓ Devido à perda de solo (incluindo queda de blocos no interior do túnel, colapso da frente e perda de solo em torno de vazios) ou sustimento inadequado, induzido pela escolha inadequada do método de construção/equipamentos/medidas de controlo.	Todos			
<b>Inadequada execução de tratamentos de terreno</b> Problemas de execução acarretam eventos de infiltração de água, instabilização da frente, assentamentos excessivos.	Principalmente <sup>9</sup> ataque pontual			

<sup>6</sup> Ataque pontual (escavação com: roçadoras, retroescavadoras, martelo hidráulico ou pneumático).

<sup>7</sup> TBM (escavação com TBM, com ou sem escudo, que pode ser simples ou duplo, EPB, lamas).

<sup>8</sup> Todos (escavação com: explosivos, ataque pontual, ataque integral (TBM)).

<sup>9</sup> Principalmente = evento existente em todos os métodos, mas que provoca consequências maiores no método referido.

Quadro I.B - Principais riscos geotécnicos relativos ao método construtivo (continuação).

Risco	Método	Sim	Não	Obs.
<b>Acompanhamento ou monitorização da obra não conforme</b> Equipa geotécnica insuficiente e/ou inexperiente, falta de procedimentos adequados na monitorização/ acompanhamento diário, plano de gestão do risco não conforme para as características da obra, etc.	Todos			
<b>Elevados esforços no sustimento</b> Deformações no sustimento, fissuras, convergências excessivas, anomalias no betão projectado, deformações nas cambotas metálicas, assentamentos excessivos nos pés das cambotas.	Todos			
<b>O material apresenta características mecânicas insuficientes para garantir a estabilidade da escavação</b> Avanços excessivos na escavação do degrau da frente levam a fissuras no sustimento e/ou perda de estabilidade da secção; rotura do degrau pode ser longitudinal ou transversal.	Ataque pontual			
<b>Afluência de um volume excessivo de água à escavação. Problemas de estanqueidade do túnel</b> A presença da água pode induzir redução de resistência, devido à degradação do maciço ou acréscimo das tensões efectivas de confinamento.	Todos			
<b>Abrasiveidade do terreno superior à preconizada</b> (e.g., devido ao elevado teor em quartzo, no maciço rochoso, provocando um desgaste excessivo nos discos de corte ou nos bits de perfuração).	Principalmente TBM			
<b>Secção instável</b> (e.g., devido a estado elevado de meteorização/fracturação do maciço).	Principalmente TBM sem escudo			
<b>Convergências radiais e instabilidades da face de escavação excessivas</b> (e.g., frente instável por fluxo de água, solo pouco coesivo e/ou queda de blocos e solo rijo fissurado, etc.).	Principalmente TBM de escudo duplo			
<b>Colapso em caso de deformações excessivas com potencial expressão à superfície</b> Assentamentos superficiais, ou subsidências em túneis pouco profundos;	Ataque pontual			
<b>Alterações frequentes das propriedades do maciço rochoso</b>	Principalmente TBM			
<b>Instabilidade de blocos rochosos em zonas com fraca cobertura</b>	Ataque pontual, TBM			
<b>Risco de bloqueio devido a fluência radial excessiva do maciço (especialmente em falhas)</b>	TBM, Ataque pontual			
<b>Maciço rochoso com fracturas muito espaçadas e rocha de elevada resistência</b>	Principalmente TBM			
<b>Presença de blocos rochosos intactos em maciços brandos</b>	Principalmente TBM			

Quadro I.B - Principais riscos geotécnicos relativos ao método construtivo (continuação).

Risco	Método	Sim	Não	Obs.
<b>Atravessamento de cavidades cársticas com dimensão superior ao corpo da tuneladora</b>	TBM			
<b>Descompressão excessiva do maciço e fracturação induzida</b> Provocam, geralmente, um maior fluxo de água para o interior do túnel, diminuindo igualmente a competência do maciço.	Explosivos e ataque pontual			
<b>Deformação excessiva sobre a parte posterior do escudo da tuneladora</b> (e.g., devida às pressões elevadas a que está sujeito o maciço rochoso em zonas de falha).	TBM com escudo			
<b>Encravamento da cabeça e/ou dos discos de corte, obstrução dos discos de corte</b> (e.g., devido ao atravessamento de zonas de falha ou esmagamento ou por aderência dos materiais escavados, com elevado teor de água e/ou argila).	TBM			

**ANEXO II - REGISTO DE RISCOS GEOTÉCNICOS PARA O CASO DE ESTUDO  
HIPOTÉTICO**





**Quadro II. A. Identificação dos perigos.**

Perigo	Localização <sup>(10)</sup>	Descrição	Causas e factores de exposição	Indícios associados à materialização do perigo	DF <sup>(11)</sup>	DIP <sup>(12)</sup>	RP <sup>(13)</sup>
1	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	Maciço descomprimido e fracturado, descontinuidades com atitudes cinematicamente desfavoráveis; solos de alteração e coluvionares com fragmentos de rocha e dispersos e soltos; declives elevados.	Abertura de fendas; queda de pequenos blocos ou sinais de outros movimentos superficiais (escorregamentos circulares/planares).	...	...	...
2	Nos emboquilhamentos e ao longo do traçado, em ZG3 ou pontualmente em zonas incertas de ZG1/ZG2.	Descompressão, percolação e/ou deformação excessiva do maciço; deslizamento de blocos.	Perturbação do maciço resultante de acções tectónicas que o descomprimiram, fracturaram (planos de xistosidade, diaclasamento), alteraram e deformaram excessivamente, correspondendo a zonas com fracas características geotécnicas e/ou hidráulicas (zonas singulares de charneira, de argilificação dos filádios, de esmagamento espessos).	Secção instável, queda pequenos blocos na secção; afluxo anormal de água ao túnel; eventual fluência, diminuição da competência do maciço, convergências excessivas; diminuição nos valores de resistividade eléctrica na prospecção na frente de avanço.			
3	Emboquilhamentos e incerta, ao longo do alinhamento.	Afluxos anormais de água, a baixa pressão com eventual arraste de material.	Maciço bastante permeável à superfície e nos primeiros metros; intrusões filoneanas de rocha básica (lamprófiro), de baixa a muito baixa resistência, e de quartzo; muito fracturadas, com atitudes variáveis, e com expressão em regra métrica.	Diminuição da resistência da rocha a ser escavada; secção instável por queda de blocos; percolação de água.			
4	Em todo o alinhamento.	Evento sísmico de magnitude (M)>6,5.	Movimentação na fronteira de placas tectónicas; com geração de ondas sísmicas, induzindo vibrações nos terrenos envolventes ao túnel.	Vibrações que originam perda súbita de resistência e deformação excessiva dos materiais; desmoronamentos.			
5	Ao longo do alinhamento, em ZG1, e eventualmente noutras zonas incertas.	Falha geológica importante já detectada e outras eventuais não detectadas.	Movimentação tectónica que originou, zonas localizadas de fracas características geotécnicas; eventual prospecção geológico - geotécnica insuficiente, no caso de não terem sido detectadas.	Diminuição da resistência da rocha a ser escavada; descompressão da secção; percolação súbita de água; aparecimento de rochas estriadas ou polidas por fricção; perda do fluido de furação e/ou diminuição da percussão reflectida na furação em avanço.			

<sup>10</sup> Nesta coluna deverá introduzir-se o quilómetro do perfil em que ocorre o perigo (e.g., Pk 0+210 – Pk 0+220). Uma vez que não se dispunha dessa informação, introduziu-se a zona mais provável de ocorrência do evento.

<sup>11</sup> DF - Desenhos e fotografias.

<sup>12</sup> DIP - Data de identificação do perigo.

<sup>13</sup> RP - Responsável pela caracterização do perigo e registo na base de dados.

**Quadro II. A. Identificação dos perigos (continuação).**

Perigo	Localização	Descrição	Causas e factores de exposição	Indícios associados à materialização do perigo	DF	DIP	RP
6	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	Fenómenos de grande deformação essencialmente associados à fluência; presença de materiais rochosos com comportamento plástico ( <i>flysh</i> ), e semi-plástico, sensíveis à deformação a níveis de tensão relativamente baixos, podendo deslocar-se para o interior do túnel; materiais que exibam aumento de volume por absorção de água (xistos, caixas de falha com enchimento argiloso, argilificação dos filádios), deslocando-se para o interior do túnel.	Convergências radiais anómalas/elevadas; presença de água em rochas plásticas e/ou ricas em minerais argilosos expansivos.			
7	Falhas ou fracturas abertas; contactos entre materiais com competência acentuadamente diferente.	Afluência de caudais de água e pressões elevadas ao túnel com arraste de material.	Escoamento subterrâneo significativo de água através de fendas/fracturas abertas, ou falhas, com expressividade na zona de influência do túnel e consequente recarga directa a partir da superfície.	Redução da tensão efectiva de confinamento; diminuição nos valores de resistividade eléctrica ou acréscimo do retorno do fluido de circulação na prospecção na frente de avanço; afluxos anormais de água nos furos de detonação.			
8C	Desmorte de camadas centimétricas a métricas, com explosivos, principalmente na ZG1.	Abrasividade/dureza da rocha anormalmente elevada.	Presença de rochas de elevada resistência e geralmente competentes (grauvaques) com composição predominantemente siliciosa.	Desgaste excessivo dos bits de perfuração dos jumbos; carga explosiva não é a suficiente para fracturar/fragmentar o maciço na zona pretendida.			
9C	Nas zonas ZG3 (nomeadamente emboquilhamentos, zonas singulares).	Massas rochosas não estabilizadas, colapsos do tecto/frente, golpes de água.	Execução inadequada ou tratamento insuficiente do terreno aplicado previamente ao avanço ou mesmo durante a escavação.	Eventos de infiltração de água; frente instável; destacamento de blocos; assentamentos excessivos; técnicos inexperientes.			
10C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2).	Sobreescavação do maciço.	Plano de fogo mal dimensionado ( <i>e.g.</i> , carga explosiva excessiva provocando uma energia explosiva periférica elevada); presença de maciço pontualmente de menor qualidade ( <i>i.e.</i> , descomprimido, fracturado) e/ou aumento do diâmetro de escavação não associado a acidentes geológicos incontrolláveis, com deterioração das características geotécnicas do maciço.	Diminuição da velocidade de propagação das ondas ( $V_p$ ) no caso do maciço estar localmente descomprimido / fracturado; escavação para além da linha “B” (limite exterior teórico do revestimento); aumento do vão nos tectos e hasteais; instabilização do maciço remanescente; velocidade vibratória do maciço rochoso excede a velocidade vibratória crítica.			

**Quadro II. A. Identificação dos perigos (continuação).**

Perigo	Localização	Descrição	Causas e factores de exposição	Indícios associados à materialização do perigo	DF	DIP	RP
11C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) e mecanicamente (ZG3).	Colapso.	Tempos de auto - sustentação incompatíveis com a duração do ciclo escavação - estabilização por recobrimento reduzido e/ou comprimento do vão não suportado excessivo e/ou inadequada parcialização da frente; avanços excessivos na escavação; sustimento insuficiente.	Descompressão anormal do maciço, sustimento insuficiente nas proximidades da frente de escavação; instabilidade da secção escavada; convergências excessivas; fenómenos de sobrefracturação.			
12C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) ou em áreas de baixo recobrimento.	Sobrefracturação do maciço com possível desprendimento de blocos.	Plano de fogo mal dimensionado; vibrações excessivas do terreno podendo afectar o maciço rochoso em vários metros de espessura; desmonte mal executado (carga excessiva de explosivos; tipo de explosivo incorrecto; técnica de desmonte inadequada).	Velocidade vibratória do maciço rochoso excede a velocidade vibratória crítica; graves problemas de instabilidade no maciço remanescente; desprendimentos de blocos do tecto, nascenças e hasteais; aumento do fluxo de água para o túnel; diminuição da competência do maciço.			
13C	Ao longo do alinhamento, sobretudo nas zonas ZG3.	Esforços elevados no sustimento.	Alteração excessiva do estado de tensão <i>in situ</i> devido à escavação e/ou tempo exagerado até aplicação do sustimento; subestimação das tensões efectivas <i>in situ</i> ; sustimento subdimensionado, mal instalado.	Deformações no sustimento, fissuras no betão projectado, convergências excessivas, deformações nas cambotas metálicas, sucessivos assentamentos no pé das mesmas.			
14C	Em zonas singulares correspondentes a anomalias geológicas (ZG3).	Deformação excessiva/eventual subsidência superficial/eventual colapso.	Acompanhamento ou monitorização da obra não conforme. Equipa geotécnica insuficiente e inexperiente, falta de procedimentos adequados na monitorização/acompanhamento diário, plano de gestão do risco não conforme para as características da obra etc., secções instrumentadas inadequadas.	Não detectáveis até ao evento de perigo se materializar.			
1M	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	Maciço descomprimido e fracturado, descontinuidades com atitudes cinematicamente desfavoráveis; solos de alteração e coluvionares com fragmentos de rocha e dispersos e soltos; declives elevados.	....			
6M	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	Fenómenos de grande deformação essencialmente associados à fluência; presença de materiais rochosos com comportamento plástico ( <i>flysh</i> ), e semi-plástico, sensíveis à deformação a níveis de tensão relativamente baixos, podendo deslocar-se para o interior do túnel; materiais que exibam aumento de volume por absorção de água (xistos, caixas de falha com enchimento argiloso, argilificação dos filádios), deslocando-se para o interior do túnel.	....			

**Quadro II. B. Análise dos riscos.**

Perigo (*)	Localização (*)	Descrição (*)	Verosim.	Consequências			Risco (**)	DV <sup>(14)</sup>	RV <sup>(15)</sup>
				Acidentes pessoais (AP)	Custos (IC)	Prazos (AO)			
1	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	4	8	2	2	22,4	...	...
2	Nos emboquilhamentos e ao longo do traçado, em ZG3 ou pontualmente em zonas incertas de ZG1/ZG2.	Descompressão, percolação e/ou deformação excessiva do maciço; deslizamento de blocos.	2	4	4	2	7,2		
3	Emboquilhamentos e incerta, ao longo do alinhamento.	Afluxos anormais de água, a baixa pressão com eventual arraste de material.	2	2	2	2	4		
4	Em todo o alinhamento.	Evento sísmico de magnitude (M)>6,5.	1	16	16	8	14,4		
5	Ao longo do alinhamento, em ZG1, e eventualmente noutras zonas incertas.	Falha geológica importante já detectada e outras eventuais não detectadas.	2	2	4	4	5,6		
6	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	3	2	4	4	8,4		
7	Falhas ou fracturas abertas; contactos entre materiais com competência acentuadamente diferente.	Afluência de caudais de água e pressões elevadas ao túnel com arraste de material.	2	2	4	4	5,6		
8C	Em camadas centimétricas a métricas principalmente na ZG1.	Abrasividade/dureza da rocha anormalmente elevada.	2	0	2	2	1,6		
9C	Nas zonas ZG3 (nomeadamente emboquilhamentos, zonas singulares).	Massas rochosas não estabilizadas, colapsos do tecto/frente, golpes de água.	1	2	2	2	2		
10C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2).	Sobreescavação do maciço.	2	2	4	4	5,6		
11C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) e mecanicamente (ZG3).	Colapso.	2	8	4	4	12,8		

<sup>14</sup> DV – Data da atribuição dos valores.

<sup>15</sup> RV – Responsável pela atribuição de valores.

(\*) – Colunas de preenchimento automático (dados importados do Quadro 6.6II.A).

(\*\*) – Valores calculados automaticamente.

**Quadro II. B. Análise dos riscos (continuação).**

Perigo	Localização	Descrição	Verosim.	Consequências			Risco	DV	RV
				Acidentes pessoais (AP)	Custos (IC)	Prazos (AO)			
12C	Nas zonas a desmontar com explosivos (ZG1 e ZG2) ou em áreas de baixo recobrimento.	Sobrefracturação do maciço com possível desprendimento de blocos.	2	2	4	2	4,8		
13C	Ao longo do alinhamento, sobretudo nas zonas ZG3.	Esforços elevados no sustimento.	2	2	4	4	5,6		
14C	Em zonas singulares correspondentes a anomalias geológicas (ZG3).	Deformação excessiva/ eventual subsidência superficial/ eventual colapso.	1	4	4	4	4		
1M	Taludes envolventes aos emboquilhamentos, zona geotécnica ZG3.	Queda de blocos/fragmentos das coluviões.	1	0	2	2	0,8		
6M	Em ZG1 (xistos), zonas singulares (fraqueza).	Terrenos deformáveis e/ou expansivos, que induzem diminuição do diâmetro do túnel e eventual colapso.	3	0	2	2	2,4		

**Quadro II. C. Apreciação dos riscos e definição das acções a empreender.**

Perigo	Risco	Nível de risco	Tipo de acção
1	22,4	Intolerável	1
2	7,2	Elevado	2
3	4	Significativo	3
4	14,4	Intolerável	1
5	5,6	Significativo	3
6	8,4	Elevado	2
7	5,6	Significativo	3
8C	1,6	Aceitável	4
9C	2	Aceitável	4
10C	5,6	Significativo	3
11C	12,8	Intolerável	1
12C	4,8	Significativo	3
13C	5,6	Significativo	3
14C	4	Significativo	3
1M	0,8	Aceitável	4
6M	2,4	Aceitável	4

**Quadro II. D. Síntese das medidas concretas a implementar.**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação a implementar		DPM ( <sup>16</sup> )	RPM ( <sup>17</sup> )	DAM ( <sup>18</sup> )	DA ( <sup>19</sup> )	
	Mitigação	Controlo e observação				D ( <sup>20</sup> )	A ( <sup>21</sup> )
1	Remoção dos blocos/fragmentos instáveis; aplicação de pregagens e/ou de betão projectado e/ou malha electrossoldada; adopção de um sistema de drenagem, superficial e/ou profunda eficiente; execução dos trabalhos preservando a segurança do pessoal.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; acompanhamento do comportamento e evolução dos taludes; medição de deslocamentos, caudais e níveis piezométricos, através de instrumentação.	...	...	...	...	...
2	Prospecção geofísica (resistividade eléctrica) ou sondagens com diagrfias instantâneas na frente de avanço para detecção prévia destas zonas; remoção dos blocos instáveis, às vezes de volumetrias consideráveis, do tecto, nascentes e hasteais; reforço em avanço do maciço superiormente à escavação (“guarda chuva” de enfilagens) e em torno da abóbada (aumento da espessura de betão projectado e da colocação de mais pregagens e/ou drenos); aplicação de pregagens não em arco mas em média linear de túnel, função da xistosidade observada e também da experiência retirada em secções similares, anteriormente escavadas; previsão atempada do stock de materiais a disponibilizar em obra (pregagens, cambotas, betão, etc.) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Controlo e interpretação dos resultados da prospecção em avanço; execução da cartografia geotécnica durante a escavação; instalação de secções de convergências, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel, comparação destes valores com os previstos em projecto; controlo da qualidade da execução dos tratamentos.					
3	Prospecção em avanço para detecção prévia destas zonas; reforço do maciço com “guarda-chuva” de enfilagens ou com recurso a pregagens; drenagem interna e respectiva bombagem; previsão de stock de bombas de água e tubagens necessárias à remoção da água em excesso permitindo, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo; em caso de colapso, a cavidade gerada deverá ser preenchida com betão pobre.	Controlo e interpretação dos resultados da prospecção em avanço; execução da cartografia geotécnica durante a escavação; controlo da qualidade da execução dos reforços; medição periódica dos eventuais caudais bombeados, bem como dos níveis freáticos envolventes em piezómetros previamente instalados, para controlo da eficácia da drenagem.					
4	Prevenção - saídas de emergência, e sua respectiva sinalização, formação do pessoal; remediação - suspensão imediata da obra.	Aumento da frequência das leituras da instrumentação colocada ao longo do alinhamento do túnel, especialmente em secções mais problemáticas (zonas de falha, esmagamento, etc.); inspecção do túnel (identificação de zonas mais susceptíveis para a queda blocos, afluxo de água, etc.).					

<sup>16</sup> DPM - Data da proposta das medidas.

<sup>17</sup> RPM - Responsável pela proposta das medidas.

<sup>18</sup> DAM - Data da aprovação das medidas.

<sup>19</sup> DA - Documentos de apoio (notas técnicas, desenhos).

<sup>20</sup> D – Designação.

<sup>21</sup> A – Autoria.

**Quadro II. D. Síntese das medidas concretas a implementar (continuação).**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação a implementar		DPM	RPM	DAM	DA	
	Mitigação	Controlo e observação				D	A
5	Execução de prospecção na frente de escavação, com registo das velocidades de avanço, fluxo de água, etc.; previsão atempada do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra, nomeadamente, bombas de água e sustimento (cambotas, betão, pregagens) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo; reforço do maciço superiormente à escavação (“guarda-chuva” de enfilagens) e em torno da abóbada (aumento da espessura de betão projectado e da colocação de mais pregagens e/ou drenos) para protecção e segurança ao avanço da escavação.	Controlo e interpretação dos resultados da prospecção em avanço; execução da cartografia geotécnica durante a escavação; instrumentação destas secções sensíveis (medição de convergências), e conveniente acompanhamento dos resultados.					
6	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e/ou da cartografia geotécnica do túnel; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento de cambotas, aumento da espessura de betão projectado, aumento da densidade de pregagens e/ou de drenos); previsão atempada do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas de água, pregagens, cambotas, betão, etc.) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; na fase de construção proceder à instalação de secções de convergência, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel; células de pressão total no contacto maciço/sustimento e no próprio sustimento; deformações no interior do maciço (extensómetros); piezómetros para avaliar a presença de água no maciço, bem como, a respectiva pressão imposta.					
7	Prospecção em avanço para eventual detecção prévia destas zonas; reforço do maciço superiormente à escavação (“guarda chuva” de enfilagens) para protecção e segurança ao avanço da escavação e em torno da abóbada (aumento da espessura de betão projectado e da densidade de pregagens e drenagem interna com posterior bombagem da água afluente ao túnel).	Controlo e interpretação dos resultados da prospecção em avanço; execução da cartografia geotécnica durante a escavação; controlo da qualidade da execução dos reforços; medição periódica dos eventuais caudais bombeados bem como dos níveis freáticos envolventes em piezómetros previamente instalados.					
8C	Uma vez que estas camadas são pouco espessas, deve-se rever o <i>stock</i> de bits de perfuração para suprir o aumento das necessidades de substituição; adaptação contínua do plano de fogo às condições encontradas e revisão do <i>stock</i> de cargas explosivas.	Verificação do desgaste dos bits de perfuração; registo e comparação dos avanços obtidos em ciclos de escavação idênticos.					
9C	Utilização de pessoal devidamente qualificado e aposta na sua formação continua; manutenção adequada do equipamento utilizado.	Controlo de qualidade dos melhoramentos e sustimentos executados; análise dos relatórios de observação das secções anteriormente escavadas, nomeadamente no que respeita a secções com características geotécnicas idênticas.					

**Quadro II. D. Síntese das medidas concretas a implementar (continuação).**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação a implementar		DPM	RPM	DAM	DA	
	Mitigação	Controlo e observação				D	A
10C	Adaptação contínua do plano de fogo a aplicar, imediatamente a partir da primeira pega, ao longo da denominada “curva de aprendizagem” em função da heterogeneidade do maciço; utilização de técnicas de pré-corte do contorno; redução da quantidade de explosivos utilizada, quer por diminuição do vão de avanço quer por maior parcialização da frente; redução da energia explosiva periférica; alteração do tipo de explosivo utilizado; previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra principalmente material de enchimento garantindo a, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo, caso necessário.	Controlo das vibrações transmitidas ao maciço (sismógrafos) e da qualidade dos métodos e técnicas de desmonte aplicados; registo sistemático dos aspectos mais significativos ligados ao desmonte, designadamente velocidades de avanço, energia dispendida na furação, consumo de explosivos, etc.; observação e estudo dos factores relativos ao maciço rochoso (características das diaclases, resistência da rocha tensões <i>in situ</i> , água) e dos factores do próprio desmonte (tipo de explosivo e factor de potência, concentração de carga explosiva, tempo de retardo, plano de fogo, erro na perfuração, diâmetro e comprimento dos furos carregados e vazios); evitar divergência ou convergência de furos, falhas na detonação ou um inadequado tempo de saída.					
11C	Prospecção na frente de avanço; adaptação contínua do projecto em função das condições geotécnicas reais do maciço: comprimento do vão/período de auto-sustentação, parcialização da frente e necessidade do sustimento aplicado; em situações mais instáveis aplicar betão projectado na frente prosseguindo a escavação em secção total com 1 metro de avanço, eventualmente com pequeno degrau e avanço na semi-secção superior; previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas, sustimentos) que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Acompanhamento, cartografia da escavação e comparação com as situações preconizadas em projecto; controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados; inspecção do sustimento aplicado (registo de aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado); instalação de convergenciómetros, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel.					
12C	Adaptação contínua do plano de fogo e do sustimento a aplicar, imediatamente a partir da primeira pega, ao longo da denominada “curva de aprendizagem” em função da heterogeneidade do maciço; redução da quantidade de explosivos utilizada, através da redução do vão de avanço ou através da maior parcialização da frente de escavação; utilização de técnicas de pré-corte do contorno, com redução da concentração de cargas periféricas e sequência de disparo com tempos de retardo adequados, para prevenir sobrefracturação; caso esta ocorra deve-se promover o reforço estrutural com sustimento adequado e tratamento excepcional do maciço (injecções de permeação); remoção de blocos eventualmente instáveis; eventual bombagem da água no túnel resultante do aumento da permeabilidade provocado pela sobrefracturação; previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Registo sistemático dos aspectos mais significativos ligados à escavação, designadamente velocidades de avanço, energia dispendida na furação, consumo de explosivos e planos de fogo, etc.; controlo das vibrações transmitidas ao maciço de modo a evitar a criação de instabilidades futuras em terrenos contíguos, ou prever a ocorrência de sobrefracturação, no caso de estas virem a ser excessivas, constituindo um critério de alerta.					



**Quadro II. D. Síntese das medidas concretas a implementar (continuação).**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação a implementar		DPM	RPM	DAM	DA	
	Mitigação	Controlo e observação				D	A
13C	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e em função do valor de RMR obtido durante a obra; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento e/ou execução de pés de elefante nas cambotas, aumento da espessura de betão projectado, colocação de mais pregagens); previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra que permitam, em caso de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo.	Verificação das condições das secções escavadas, de forma sistemática, através da aplicação das classificações geomecânicas; instalação de células de pressão total no sustimento; extensómetros para medição de deslocamentos internos; secções de convergência, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel; piezómetros para medição das pressões hidrostáticas exercidas pela água sobre os sustimentos.					
14C	Utilização de pessoal devidamente qualificado e aposta na sua formação continua; reforço adicional do sustimento; actualização e revisão do plano de gestão do risco e consulta de especialistas.	Seleccionar uma equipa externa experiente para apoio da observação e controlo da obra; aplicação e adaptação dos pressupostos do projecto de execução; controlo da implementação das medidas de gestão do risco; proceder à instalação de instrumentação adequada e comparar sempre que necessário os valores obtidos com os previstos.					
1M	---	Inspecções visuais regulares dos reforços aplicados, bem como controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta, para detecção de eventuais sinais de anomalias reveladoras de perigos potenciais.					
6M	---	Aferição do redimensionamento do sustimento aplicado através de inspecções visuais regulares bem como controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta, para detecção de eventuais sinais de anomalias reveladoras de perigos potenciais.					

**Quadro II. E. Síntese das medidas efectivamente adoptadas.**

Perigo	Medidas de mitigação e de controlo e observação adoptadas		P ( <sup>22</sup> )	RIM ( <sup>23</sup> )	Doc ( <sup>24</sup> )	Ft ( <sup>25</sup> )
	Mitigação	Controlo e observação				
1	Remoção dos blocos/fragmentos instáveis; pregagens de x m de comprimento distribuídos segundo uma malha de y m por z m; aplicação de betão projectado; sistema de drenagem superficial por valetas e meias canas instaladas em banquetas, nas bermas e nas cristas dos taludes; impedimento da permanência ou circulação de pessoal na área eventualmente afectada pela queda de blocos.	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação e comparação com as previsões do projecto; acompanhamento do comportamento e evolução dos taludes; medição de deslocamentos, caudais e níveis piezométricos, através instalação da instrumentação (medidores de fendas, inclinómetros, piezómetros); leitura e interpretação dos resultados.				
6	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e/ou da cartografia geotécnica do túnel; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento de cambotas, aumento da espessura de betão projectado, aumento da densidade de pregagens e/ou de drenos); previsão atempada do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas de água, pregagens, cambotas, betão, etc.).	Execução da cartografia geotécnica durante a escavação; células de pressão total no contacto maciço/sustimento e no próprio sustimento; instalação de convergenciómetros em ZG1 – perfis distanciados de x m; medição bimensal nas primeiras seis semanas e, posteriormente, mensal; zonas singulares o espaçamento entre perfis a instrumentar foi inferior a y m. A periodicidade inicial das medições foi de três por semana, durante os primeiros dois meses; medições das deformações no interior do maciço (extensómetros); piezómetros para avaliar a presença de água no maciço, bem como, a respectiva pressão imposta.				
11C	Adaptação contínua do projecto em função das condições geotécnicas reais do maciço: comprimento do vão/período de auto-sustentação, parcialização da frente e necessidade do sustimento aplicado; aplicação de betão projectado na frente prosseguindo a escavação em secção total com 1 metro de avanço, eventualmente com pequeno degrau e avanço na semi-secção superior, em situações mais instáveis; previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra (bombas, sustimentos).	Acompanhamento, cartografia da escavação e comparação com as situações preconizadas em projecto; controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados; inspecção do sustimento aplicado (registo do aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado); instalação de convergenciómetros, para medição de deformações e deslocamentos no interior do túnel.				
13C	Redimensionamento do sustimento com base em prospecção na frente de avanço e em função do valor de RMR obtido durante a obra; reforço a curto prazo do sustimento aplicado (diminuição do espaçamento e/ou execução de pés de elefante nas cambotas, aumento da espessura de betão projectado, colocação de mais pregagens); previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra.	Observação da secção escavada, nomeadamente, o registo de aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado; instalação de células de pressão total no sustimento; piezómetros para medição das pressões hidrostáticas exercidas pela água sobre suportes impermeáveis; instalação de convergenciómetros, em ZG3 – perfis distanciados de z m; medição duas vezes por semana nas primeiras seis semanas e, posteriormente, quinzenal; em zonas singulares o espaçamento entre perfis a instrumentar foi inferior a y m. A periodicidade inicial das medições foi de três por semana, durante os primeiros dois meses.				
1M	---	Foram efectuadas inspecções visuais às superfícies tratadas com betão projectado, controlo apertado da instrumentação instalada e verificação do comprimento dos critérios de alerta.				
6M	---	Avaliou-se o redimensionamento do sustimento aplicado através de inspecções visuais e dos resultados da instrumentação.				

<sup>22</sup> P – Período.

<sup>23</sup> RIM - Responsável pela implementação das medidas.

<sup>24</sup> Doc - Documentos “as built”.

<sup>25</sup> Ft – Fotografias.

**Quadro II. F. Síntese da observação e revisão das medidas empreendidas.**

Perigo	Observação e revisão das medidas empreendidas	DOR ( <sup>26</sup> )	RA ( <sup>27</sup> )	DAA ( <sup>28</sup> )
1	A remoção dos blocos mostrou-se bastante eficaz reduzindo em grande parte o risco envolvido; no entanto admite-se que o reforço da malha de pregagens pudesse ter conduzido a uma solução à partida mais favorável do ponto de vista dos riscos envolvidos; aconselha-se a manutenção do sistema de drenagem superficial; a leitura e interpretação dos resultados da monitorização mostram que as acções empreendidas em boa medida trataram o risco existente; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.			
6	Verifica-se que o sustimento tem sido adaptado correctamente às condições geotécnicas encontradas; a previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra tem permitido salvaguardar custos e prazos no reforço do maciço; as medições de convergências têm possibilitado aferir a fiabilidade e segurança dos sustimentos instalados tendo, pontualmente, conduzido ao seu reforço; as mesmas deverão ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.			
11C	Para este caso aconselha-se que a parcialização da frente seja continuamente adaptada às condições encontradas; a previsão do <i>stock</i> de materiais a disponibilizar em obra possibilitou num caso único de emergência, a sua aplicação no mais curto espaço de tempo; o controlo das velocidades de avanço em função dos vãos auto-portantes, tempo de auto-sustentação e sustimentos aplicados, deve ser mais rigoroso; as medições das convergências deverão ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; o risco deve sofrer nova redução e ser reavaliado após a implementação destas medidas; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta.			
13C	Sempre que se verifiquem valores anómalos de deformação, tem-se reforçado a curto prazo o sustimento colocado; a sucessiva adaptação dos sustimentos aplicados tem sido em função da experiência obtida; a observação da secção escavada, nomeadamente, o registo do aparecimento de água ou de fissuras no betão projectado levou ao reforço pontual do sustimento já aplicado; as medições de convergências devem ser prolongadas até à execução do revestimento definitivo do túnel; preconiza-se o aumento da frequência das leituras sempre que se registem valores anormais de deformação; os mesmos devem ser comparados com os respectivos critérios de alerta; estes devem ser continuamente revistos.			
1M	Atendendo ao aparecimento de indícios associados a eventuais deslizamentos localizados, foi reforçada a malha de pregagens na zona; as medidas inicialmente preconizadas complementadas com o reforço enunciado permitiram controlar os riscos; não se registou a criação de novos riscos associadas à adopção destas medidas.			
6M	As medidas inicialmente preconizadas têm até ao momento permitido controlar os riscos.			

<sup>26</sup> DOR - Data da observação e revisão.

<sup>27</sup> RA - Responsável pela apreciação.

<sup>28</sup> DAA - Data da aprovação da apreciação.